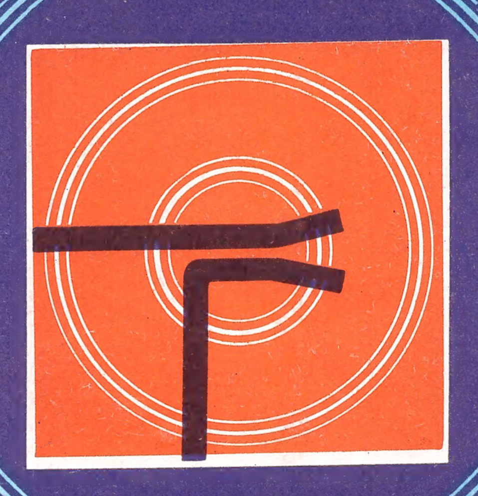
А. Я. КЛЕМЕНТЕНКО
Б. А. ПАНОВ
В. Ф. СВЕШНИКОВ

Контактные помехи радиоприему



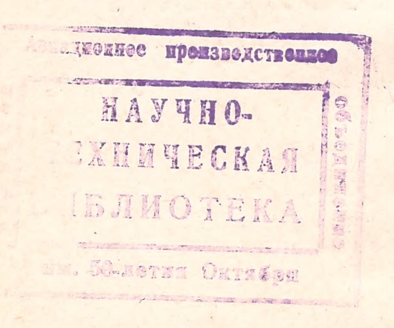


А. Я. КЛЕМЕНТЕНКО,
Б. А. ПАНОВ,
В. Ф. СВЕШНИКОВ

КОНТАКТНЫЕ ПОМЕХИ РАДИОПРИЕМУ

Ордена Трудового Красного Знамени
ВОЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МИНИСТЕРСТВА ОБОРОНЫ СССР
МОСКВА — 1979

ББК 32.841
К48
УДК 621.391.82



Клементенко А. Я. и др.

К48 Контактные помехи радиоприему/А. Я. Клементенко, Б. А. Панов, В. Ф. Свешников.— М.: Воениздат, 1979.— 116 с., ил.

30 к.

В книге дается определение контактным помехам. Излагаются основы теории этого вида радиопомех. Вскрывается их физическая сущность, рассматриваются спектральный состав и амплитудные характеристики. Приводятся практические рекомендации по способам борьбы с контактными помехами и методы обеспечения условий электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств подвижных объектов при наличии контактных помех.

Книга рассчитана на радиоспециалистов, занимающихся разработкой и эксплуатацией подвижных узлов связи и радиоэлектронной аппаратуры.

К $\frac{30402\text{-}103}{068(02)\text{-}79}$ БЗ-18-14.79.2402040000
Тпл. 1978 г.—№ 89

ББК 32.841
6Ф1

ПРЕДИСЛОВИЕ

На современном этапе научно-технического прогресса в связи с ростом социальной активности во всех областях человеческой деятельности происходит бурное увеличение количества подвижных объектов. К числу таких объектов относятся корабли, самолеты, автомашины, железнодорожные составы и др. Единственным средством обмена информацией с людьми, находящимися на подвижных объектах, является радиосвязь. Количество подвижных радиостанций во всех странах земного шара удваивается каждые 4—5 лет.

Мобильная радиосвязь проникает во все новые и новые сферы деятельности человека. В настоящее время она обслуживает противопожарную службу, скорую медицинскую помощь, такси, прессу, автоинспекцию, геологов, работников государственного аппарата, рыбаков и т. д. Еще более быстрому развитию этого вида радиосвязи препятствует сложная помеховая обстановка на подвижных объектах.

На незначительных площадях подвижных узлов связи расположено большое количество всевозможных радиоэлектронных средств. В числе таких средств могут быть связные радиопередающие, радиоприемные и радиорелейные устройства, радиолокационные станции, радионавигационная аппаратура, средства опознавания и т. д.

На современном большом самолете устанавливается более 25 радиотехнических устройств различного назначения. Радиооборудование современных больших кораблей составляет 30—40 радиоэлектронных устройств. Отсюда становится ясно, насколько трудно обеспечить совместную работу такого большого количества радиосредств, размещенных на одном объекте.

На радиосвязь с подвижных объектов оказывают влияние все традиционно известные виды помех, многие из которых хорошо и подробно изучены. Однако помеховая обстановка при ведении радиосвязи с подвижных объектов характеризуется специфическими особенностями. Прежде всего это относительно близкое раз-

мещение потенциальных источников помех к радиоприемным устройствам, из-за чего существует большое число возможных путей воздействия помех на радиоприем, и даже сравнительно слабые помехи могут оказывать мешающее влияние. Другая особенность состоит в возникновении контактных помех при ведении радиосвязи во время движения подвижных объектов.

Этот вид помех специалистам по радиотехнике и радиолюбителям известен давно. Во время прослушивания они проявляются в виде треска и шума за счет протекания высокочастотного тока через несовершенные переменные контакты, неплотные или разъеденные ржавчиной механические сочленения.

Совершенно по-новому встал вопрос о поведении переменных контактов, образующихся из элементов конструкции транспортной базы и облучаемых мощными электромагнитными полями установленных радиопередатчиков, при организации радиосвязи с подвижных объектов. Из-за своей широкополосности и достаточно высокого уровня контактные помехи на подвижных объектах являются преобладающими по сравнению со всеми другими видами помех. Поэтому без детального изучения контактных помех и разработки эффективных способов борьбы с ними трудно обеспечить устойчивую радиосвязь с подвижных объектов. До сих пор этому вопросу уделялось недостаточно внимания. Многие авторы стремились подогнать контактные помехи под один из уже изученных видов помех и тем самым считать проблему решенной. Проблема борьбы с контактными помехами заслуживает самостоятельного рассмотрения.

Специфический характер организации радиосвязи в условиях действия контактных помех изучен недостаточно полно, что является одной из основных причин, препятствующих более быстрому развитию железнодорожной, корабельной, автомобильной и самолетной радиосвязи. Данная работа в некоторой степени восполняет пробел в этой области. В ней делается попытка дать определение контактным помехам, вскрыть их источники и физическую сущность, проанализировать спектральные и амплитудные характеристики, разработать предложения по методам борьбы с помехами этого вида и обеспечения условий электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств, установленных на подвижных объектах.

Глава 1

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПОМЕХОВОЙ ОБСТАНОВКЕ НА ПОДВИЖНЫХ УЗЛАХ СВЯЗИ

1.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

До настоящего времени по контактным помехам нет фундаментальных изданий и даже не существует твердо установившихся понятий и определений. Напротив, очень часто приходится встречать разное, а иногда противоречивое толкование одних и тех же вопросов в этой области.

Специалисты по измерениям температуры вращающихся деталей машин под контактными помехами понимают помехи, обусловленные появлением термоэлектродвижущих сил между контактирующими с трением скольжения элементами измерительных цепей. В ряде работ контактными помехами называются шумы, возникающие в результате дискретности изменения очагов контактной проводимости и дисперсной структуры материалов проводников. В некоторых материалах контактные помехи отождествляются с индустриальными помехами от коммутации токонесущих цепей различного электрического и радиотехнического оборудования.

Определение контактных помех дано авторами работ [6, 12]. Из них первая статья посвящена исследованию контактных помех в антенно-мачтовых устройствах при воздействии на них ветровых нагрузок, а вторая при ведении дуплексной связи с автомашины. В книге [2] помехи от облучаемых переменных контактов на судах называются такелажными.

Контактными помехами в дальнейшем **будем называть помехи радиоприему, возникающие в результате воздействия электромагнитного поля радиопередатчиков в ближней зоне на контакты с переменным сопротивлением при работе радиосредств в движении.**

Из определения следует, что контактные помехи присущи всем подвижным узлам связи, работающим в движении по радио одновременно на прием и передачу. Причиной возникновения контактных помех являются контакты с переменным сопротивлением, находящиеся в электромагнитном поле радиопередатчиков.

Контактами с переменным сопротивлением или переменными контактами в данном случае называются системы из двух или более соприкасающихся металлических элементов конструкции подвижного объекта, сопротивление между которыми в движении изменяется по случайному закону в широких пределах.

В любом подвижном объекте имеется большое количество всевозможных контактов. На стоянке сопротивление этих контактов остается постоянным. Такие контакты с постоянным сопротивлением даже в мощном электромагнитном поле радиопередатчиков существенных помех радиоприему не создают. Совершенно другая картина наблюдается в движении, когда сопротивление контактов в результате толчков, тряски, вибрации и качки начинает случайным образом изменяться. Тогда переменные контакты при наличии электромагнитного поля своих радиопередатчиков становятся источниками достаточно интенсивных и широкополосных помех радиоприему, названных контактными помехами.

Отсюда также следует, что на подвижных объектах принципиально нельзя рассматривать помехи своих радиопередатчиков, работающих на разных радионаправлениях, только как мешающее действие посторонних радиостанций на основных рабочих частотах и их гармониках. На подвижных узлах связи при наличии контактов с переменным сопротивлением в электромагнитном поле своих радиопередатчиков возникает совершенно специфический вид помех с характерными, только им присущими параметрами.

В правильности высказанных соображений можно убедиться путем измерения или даже прослушивания помех на подвижных объектах на стоянке и в движении при включенных и выключенных своих радиопередатчиках. Контактные помехи имеют жесткую корреляционную связь с работой радиопередатчиков подвижных объектов и зависят от мощности и частотного спектра, излучаемого ими электромагнитного поля. Они существуют

только при наличии работающих на излучение своих радиопередатчиков в движении, а их источниками являются переменные контакты.

1.2. ПОМЕХОВАЯ ОБСТАНОВКА НА ПОДВИЖНЫХ УЗЛАХ СВЯЗИ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Помеховая обстановка на подвижных объектах, так же как и в любых радиоэлектронных комплексах, определяется количеством потенциально-возможных источников помех, уровнем и частотным распределением создаваемых ими помех на входе радиоприемных устройств.

Помехами вообще называются всякие посторонние по отношению к действующему каналу связи электромагнитные и электрические колебания, приводящие к искажению основных полезных сигналов и ухудшению достоверности передаваемой информации.

Изучение помеховой обстановки предполагает классификацию помех по тем или иным признакам. Но, к сожалению, до настоящего времени как в нашей стране, так и за рубежом нет общепринятой классификации помех радиоприему. Это положение объясняется тем, что в рамках одной классификации практически невозможно разделение помех по всей совокупности характеризующих их признаков.

По происхождению помехи делят на искусственные и естественные. Возникновение искусственных помех связано с деятельностью человека, естественных — с явлениями и процессами, происходящими в природе.

По статистическим свойствам принято деление помех на синусоидальные, флуктуационные и импульсные. В последнее время согласно рекомендациям Международного консультативного комитета по радио (МККР) признано целесообразным выделить еще один вид помех — квазиимпульсные. Это промежуточный вид, сочетающий свойства флуктуационных и импульсных помех. Экспериментальная статистика свидетельствует, что большая группа индустриальных помех может быть отнесена к этому виду. Типичным примером синусоидальных помех являются сосредоточенные по спектру помехи от посторонних радиостанций.

По характеру воздействия на радиоприем различают аддитивные и мультипликативные помехи. Аддитивные

помехи алгебраически суммируются в приемном устройстве с полезными сигналами. Большинство из известных видов помех, такие, как тепловые шумы, дробовой эффект, атмосферные, космические и индустриальные помехи, может быть причислено к этому классу. Действие мультипликативных помех состоит в модуляции по случайному закону амплитуды и фазы полезного сигнала. Помехи этого вида связаны в основном с распространением радиоволн.

Тогда общая формула сигнала $S(t)$, принятого по радио с учетом воздействия на него помех различного вида, может быть представлена в виде

$$S(t) = \sum_{m=1}^{M} \mu_m s_m (t - \tau_m) + \sum_{n=1}^{N} s_n (t). \qquad (1.1)$$

Первая часть формулы (1.1) отражает факт многолучевого характера распространения радиоволн. Сигнал, переданный по радио, приходит к месту приема разными путями, число которых равно M. На каждом из этих путей сигнал по-разному затухает, что учитывается множителем μ_m, и запаздывает на различное время τ_m. Вторая часть формулы показывает, что на переданный сигнал накладывается N различных аддитивных помех.

Помеховая обстановка на подвижных узлах связи характеризуется многообразием видов помех и путей воздействия их на радиоприем. Общий уровень помех на входе радиоприемного устройства подвижного объекта образуется в результате наложения мешающих воздействий от множества источников, различающихся как по местонахождению, так и по виду создаваемых ими радиопомех.

В интересах изучения помеховой обстановки на подвижных объектах классификацию радиопомех целесообразно начать с разделения на внешние и внутренние помехи.

К внешним радиопомехам относятся помехи, источники которых расположены за пределами подвижного объекта, а их воздействие на полезный сигнал осуществляется через антенны приемных устройств. Для радиоприемных устройств подвижных узлов связи внешними помехами являются:

— сосредоточенные помехи от посторонних радиостанций;

— космические помехи;

— атмосферные помехи;

— индустриальные помехи.

К внутренним помехам относятся радиопомехи, источники которых расположены внутри самого подвижного объекта. Они могут проникать в приемный тракт как через антенно-фидерное устройство, так и по цепям питания, заземления, коммутации и через несовершенные экраны приемников. Возникновение внутренних помех связано с функционированием установленного электро- и радиооборудования, а также с работой машин и агрегатов, обеспечивающих передвижение узла связи.

Внутренние помехи по своему происхождению можно подразделить:

— на помехи от электрооборудования подвижного объекта;

— на помехи от собственных радиопередатчиков;

— на взаимные помехи между радиоприемниками;

— на контактные помехи.

Характеристики внешних помех достаточно хорошо изучены во многих работах и в данной работе не рассматриваются.

Основными путями воздействия внутренних помех в условиях подвижных объектов являются:

— непосредственное облучение приемных антенн электромагнитным полем помех (прямая связь);

— гальваническая связь приемников с источниками помех;

— косвенная связь.

Под косвенной связью понимается емкостная, индуктивная или электромагнитная связь приемника с вторичным носителем помех. При этом под вторичными носителями подразумеваются переносчики помех, не имеющие гальванической связи ни с источником помех, ни с приемником. В условиях подвижных объектов ими могут быть проводящая масса корпусов, различного рода кабели, контактный провод на электрифицированных железных дорогах, электропроводка освещения и т. д.

Внутренние помехи от электрооборудования подвижных объектов по своему происхождению и характеру не отличаются от индустриальных помех. Они возникают в результате искрения или резкого изменения ра-

бочих токов в цепях различных электрических устройств. К числу таких устройств могут быть отнесены коллекторные генераторы и моторы постоянного тока, коммутационное оборудование, регуляторы, выключатели и переключатели, система зажигания двигателей внутреннего сгорания и другое электрооборудование. Особенно большое число таких источников помех на судах и самолетах.

Из внутренних помех наибольшую величину составляют помехи от систем зажигания двигателей внутреннего сгорания, которые установлены на всех подвижных объектах, кроме электропоездов.

Уровень радиопомех на автомобиле ЗИЛ-150 без оборудования помехоподавляющими устройствами может достигать 500 мкВ, что практически исключает возможность ведения устойчивой радиосвязи.

Основными методами подавления внутренних помех индустриального характера являются полное и частичное экранирование системы зажигания и каждого в отдельности электрооборудования, а также фильтрация цепей этого оборудования, которые могут создать помехи радиоприему.

Этим путем уровень поля помех на том же автомобиле ЗИЛ-150 может быть снижен до 2 мкВ/м. При этом необходимо иметь в виду, что даже в пределах подвижного объекта большое значение имеет удаление приемных антенн и радиоприемных устройств от источников помех. Напряженность поля помех с удалением от их источников быстро убывает. Поэтому радиоприемные устройства и их антенны должны быть, безусловно, удалены от источников помех на расстояние более $\lambda/2\pi$.

При отсутствии гальванической связи источника помех с радиоприемным устройством воздействие помех в диапазоне 0,15—3,0 МГц в радиусе до 10 м от приемной антенны происходит в основном за счет емкостных и индуктивных связей.

С увеличением частоты радиус ближней зоны уменьшается и поэтому антенны радиосредств, работающих в диапазоне частот выше 100 МГц, можно располагать на более близком расстоянии от источников помех.

На подвижных узлах связи имеются также специфические помехи, характерные только для конкретного того или иного вида транспорта. В качестве примеров таких помех можно привести радиопомехи, вызванные

электризацией самолетов, помехи от высоковольтных линий электропередачи и контактной сети электрифицированных железных дорог и др.

Электризация самолетов может происходить в результате трения корпуса самолета о воздух и взвешенные в нем частицы пыли, дыма, снежинок, льдинок и т. д. Корпус самолета может электризоваться также за счет соприкосновения его с уже заряженными частицами, находящимися в воздухе, или путем индукции при полете вблизи заряженных облаков. Плотность электрических зарядов имеет наибольшее значение в местах корпуса самолета, где малый радиус изгиба или имеются острые кромки. Так, например, у концов крыльев, лопастей винтов она в 5—8 раз выше, чем плотность заряда на поверхности средней части фюзеляжа. Уровень электризации корпуса самолета (вертолета) бывает настолько высок, что может привести к коронному разряду с широким спектром помех.

Электростатические помехи зависят от скорости полета. Их уровень возрастает пропорционально кубу скорости. Вредность электризации не ограничивается только этим. Разность потенциалов в различных местах наэлектризованного корпуса самолета вызывает протекание уравнительных токов, которые, проходя через переменные контакты в полете, создают дополнительные помехи.

Явления электризации имеют место и в условиях наземных подвижных объектов. Например, при ветреной погоде, движении по запыленным дорогам корпуса автомашин также приобретают значительный электростатический заряд, который может привести к возникновению помех радиоприему.

На железнодорожном транспорте высоковольтные линии и контактная сеть являются источниками довольно интенсивных помех радиоприему. Помехи высоковольтных линий обусловлены наличием коронного разряда высокого напряжения на неровностях и неоднородностях проводов этих линий. Контактная сеть создает импульсные помехи радиоприему при нарушении контакта между проводом контактной сети и пантографом электровоза. Воздействие этих помех на приемные антенны подвижного объекта характеризуется возникновением во входных контурах радиоприемников затухающих колебаний. Частота следования импульсных помех такова, что отдельные серии затухающих колебаний вза-

имно не перекрываются, из-за чего амплитуда помехи на выходе приемника изменяется в широких пределах.

Однако и здесь нельзя ограничиваться только учетом помех индустриального характера. Контакты контактной сети и ее опор при прохождении железнодорожного состава от колебаний и вибраций становятся переменными и под воздействием облучения электромагнитным полем передатчиков проходящих подвижных узлов связи излучают контактные помехи. Кроме того, контактная сеть снижает эффективность борьбы с контактными помехами на железнодорожном транспорте.

При наличии контактной сети нельзя для борьбы с контактными помехами в полной мере использовать пространственный разнос между передатчиками и приемниками. Это объясняется тем, что при любом пространственном разносе между передатчиками и приемниками приемная антенна всегда находится вблизи помехонесущей проводки, в данном случае — контактной сети.

1.3. КОНТАКТНЫЕ ПОМЕХИ РАДИОПРИЕМУ И ИХ ИСТОЧНИКИ

При эксплуатации радиосредств, установленных на подвижных объектах, было замечено, что уровень помех радиоприему при одновременной работе передающих и приемных средств во время движения резко возрастал по сравнению с уровнем помех на стоянке при всех прочих равных условиях. Около основной рабочей частоты передатчика и ее гармонических составляющих появлялись широкие полосы частот с высоким уровнем помех и поэтому практически непригодных для использования в качестве рабочих частот для приемников подвижного объекта.

Достаточно прекратить движение или выключить радиопередатчики, как уровни помех принимали обычные значения. Описанные явления не могли быть объяснимы возрастанием уровней внутренних помех индустриального характера, а мешающее воздействие внешних помех (атмосферных, космических, промышленных и сосредоточенных) не зависит от состояния подвижного объекта и установленного на нем радиоэлектронного оборудования.

Также не подтвердилось предположение о расширении спектра излучений собственных радиопередатчиков во время движения объекта. При настройке приемника работа собственных передатчиков прослушивалась лишь в пределах узких полос частот, значительно меньших, чем полосы частот, поражаемых для приема.

Эти соображения побудили разработчиков к тщательному анализу явлений, сопровождающих процесс ведения радиосвязи с подвижных объектов во время их движения.

Было установлено, что причина появления повышенного уровня помех радиоприему при организации двухсторонней радиосвязи с автомашин, самолетов, вертолетов, судов и железнодорожных поездов кроется во взаимодействии электромагнитного поля в ближней зоне своих передатчиков и несовершенных контактов конструкции транспортной базы подвижных объектов.

Работающие радиопередатчики как на стоянке, так и в движении на металлических корпусах, кузовах, верхнепалубных надстройках и других деталях конструкции подвижных объектов наводят значительный высокочастотный потенциал. Величина этой наведенной электродвижущей силы (ЭДС) зависит от многих факторов: мощностей, частоты и спектра излучений передатчиков, геометрических размеров, материала, формы и состояния облучаемых конструкций подвижных объектов. Измеренные величины наведенных ЭДС в зависимости от мощности излучения передатчиков и мест проведения измерений составляют десятки и сотни вольт.

Протекание тока, вызванного наведенной ЭДС, по элементам конструкции подвижных объектов приводит к возникновению вторичного электромагнитного поля, взаимодействующего с облучающим полем передатчика.

На стоянке спектр электромагнитного поля вторичного излучения совпадает со спектром первичного электромагнитного поля. Вторичное электромагнитное поле в этом случае воспринимается так же, как и первичное, и не создает помех радиоприему.

Заряженная поверхность конструкции подвижного объекта становится излучателем вторичного электромагнитного поля с широким спектром частот, когда

под действием вибрации, тряски и качки электрические сопротивления между элементами конструкции начинают меняться в широких пределах. Токи проводимости наведенных ЭДС, протекая через такие переменные контакты, изменяют свой спектральный состав. Электромагнитное поле вторичного излучения в этом случае будет отличаться от облучающего поля. Теперь в составе спектра радиопомех кроме всех компонент первоначального электромагнитного поля передатчиков, как это было на стоянке, появляются дополнительные, расположенные как в пределах полосы частот облучающего излучения, так и за ее пределами.

Полосы частот, пораженных контактными помехами, возникают не только около основных и гармонических излучений передатчиков подвижного объекта. В определенных условиях ими поражаются также частоты, образованные комбинациями частот одновременно работающих передатчиков. Экспериментально обнаружена зависимость уровня контактных помех и полосы занимаемых ими частот от скорости движения подвижного объекта. Объяснение указанных явлений приводится в последующих главах книги.

На самолетах, вертолетах, судах, автомашинах и поездах очень много различных механических соединений, плотность соприкосновения деталей в которых в процессе движения подвижного объекта становится непостоянной. Переменные контактные сопротивления возникают между деталями конструкций подвижных объектов там, где отсутствует сплошная сварка или пайка. До настоящего времени на многих видах транспорта еще в массовом масштабе применяется сварка прерывистым швом и даже клепка, которые не обеспечивают постоянного электрического сопротивления между проводящими элементами конструкции. Поэтому даже на корпусах судов, фюзеляжах самолетов, кузовах вагонов и автомашин образуются переменные контакты.

Наибольшую опасность с точки зрения контактных помех имеют контакты, связанные с ходовой частью транспорта. Так, например, на железнодорожном транспорте наибольший уровень контактных помех создают тележки, суфле и межвагонные соединения. Высокий уровень контактных помех возникает при контактировании элементов конструкции с большой поверхностью

или большими размерами (верхнепалубные мачты и леерные ограждения на судах, крыши вагонов и кузовов, оттяжки антенн).

Акустическое проявление контактных помех при прослушивании зависит от характера изменения контактных сопротивлений в порождающих их переменных контактах. Контактные помехи за счет непостоянства переходного сопротивления между осью и лопастями вертолета прослушиваются в виде интенсивной шумовой помехи, помехи за счет резких изменений контактного сопротивления между колесами железнодорожного вагона и рельсами — в виде характерного треска с частотой прохождения рельсовых стыков колесами вагонов.

Таким образом, условиями возникновения контактных помех являются наличие облучающего электромагнитного поля и контактирующихся элементов из проводящего материала с переменными контактными сопротивлениями между ними. Условия эти выполняются всегда при ведении двухсторонней радиосвязи с подвижных объектов во время движения.

ФИЗИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ ВОЗНИКНОВЕНИЯ КОНТАКТНЫХ ПОМЕХ

2.1. ПРОВОДНИКИ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

Выяснение физики возникновения контактных помех, оценка влияния того или иного фактора на частотный спектр и распределение их уровня могут быть проведены путем теоретического анализа явлений при облучении переменных контактов высокочастотным электромагнитным полем. Результаты такого анализа необходимы также для теоретического обоснования и целенаправленной разработки мер борьбы с контактными помехами.

В условиях стоянки между элементами корпуса подвижных объектов существует устойчивый во времени контакт, что позволяет при излучении радиопередающих устройств подвижного узла связи (ПУС) рассматривать корпус и отдельные элементы конструкций подвижного объекта как проводящие тела, помещенные в высокочастотное электромагнитное поле.

Взаимодействие поля и вещества определяется уравнениями классической электродинамики, выведенными Максвеллом. Согласно теории электромагнитного поля на поверхности раздела двух сред должны выполняться следующие граничные условия [7]:

$$E_{\tau_1} = E_{\tau_2};$$
$$B_{n_1} = B_{n_2};$$
$$H_{\tau_1} = H_{\tau_2};$$
$$D_{n_1} - D_{n_2} = \sigma,$$

где E_τ — тангенциальная составляющая вектора электрической напряженности;
B_n — нормальная составляющая вектора магнитной индукции;

H_τ — тангенциальная составляющая вектора магнитной напряженности;

D_n — нормальная составляющая вектора электрической индукции;

σ — поверхностная плотность заряда.

При чисто металлической поверхности раздела

$$H_{\tau_2} = J, \ E_{n_2} = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \ H_{n_1} = 0,$$

где J — плотность поверхностного тока проводимости;

ε — диэлектрическая постоянная среды.

Из граничных условий следует, что под влиянием внешнего облучающего поля на поверхности проводника возникает электродвижущая сила (ЭДС) с фазой, противоположной фазе облучающего поля. За счет этой ЭДС суммарная тангенциальная составляющая вектора электрической напряженности на границе раздела будет равняться нулю.

Точный расчет величины ЭДС, наводимой облучающим электромагнитным полем на проводниках произвольной конфигурации, представляет сложную проблему. В настоящее время решение граничных задач электродинамики получено лишь для ограниченного круга случаев.

Элементы корпусов реальных подвижных объектов могут образовывать различные системы проводящих тел, которые можно разбить на две большие группы: разомкнутого и замкнутого типов.

Если протяженные элементы конструкций имеют поперечные размеры много меньше длины волны облучающего электромагнитного поля, то их можно рассматривать как облучаемые цилиндры.

Пусть длина облучаемого протяженного металлического цилиндра, необязательно прямолинейного, равна l (рис. 2.1).

Величина ЭДС de, наведенной облучающим полем на единице длины dl проводника, определится по формуле

$$\mathrm{d}e = E_\tau \mathrm{d}l = \overline{E} \sin\theta_i \exp\left[jkl\cos\theta_i\right] \mathrm{d}l,$$

где θ_i — угол между направлением распространения электромагнитной волны и участком dl поверхности цилиндра;

k — коэффициент фазы.

Амплитуда и фаза элементарных ЭДС по участкам проводника определяются положением элементарных участков по отношению к вектору $\bar{E}$ облучающего поля.

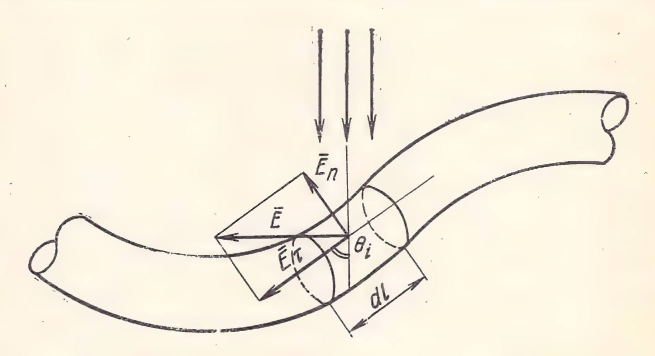


Рис. 2.1. Проводник, облучаемый электромагнитным полем

ЭДС, наводимая по всей длине цилиндра, представится суммой элементарных ЭДС

$$E=\int_0^l \mathrm{d}e=\int_0^l Ef(l)\,\mathrm{d}l,$$

где $f(l)$ — функция распределения плотности тока по длине цилиндра.

Функция $f(l)$ определяется конфигурацией и расположением проводящего тела в электромагнитном поле. В частности, для прямолинейного цилиндра в дальней (волновой) зоне электромагнитного поля излучателя $f(l)$ имеет вид

$$f(l)=\frac{\sin\left[\kappa\,(l-x)\right]}{\sin\,(\kappa l)}\ ,$$

где $\kappa=\frac{2\pi}{\lambda}$ (λ — длина волны облучающего поля);

x — расстояние от края проводника, $0\leqslant x\leqslant l$.

В случае когда облучаемая часть конструкции представляет замкнутый элемент типа рамки (рис. 2.2), то наводимая в ней суммарная ЭДС определяется нормальной составляющей магнитной напряженности облучающего поля. Под влиянием изменения во времени магнит-

ного потока Φ возбуждается ЭДС, вычисляемая по формуле

$$E = -n \frac{d\Phi}{dt} = -j\omega\mu HS \exp(j\omega, t)\, n \sin\theta,$$

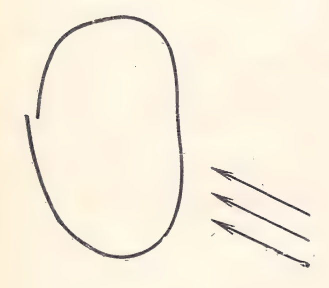


Рис. 2.2. Облучаемый элемент типа рамки

где n — число витков рамки;
H — напряженность магнитного поля;
S — площадь, образованная рамкой;
θ — угол между вектором магнитной напряженности поля и плоскостью рамки.

Вычислив наведенную разность потенциалов, можно определить ток проводимости в облучаемых проводниках по формуле

$$I = \frac{U}{Z},$$

где U — напряжение, наведенное облучающим электромагнитным полем;
Z — сопротивление проводника.

Протекание тока в облучаемых проводниках сопровождается возникновением вторичного электромагнитного поля, имеющего ту же спектральную структуру, что и облучающее электромагнитное поле, но отличающегося от него амплитудой и фазой. Взаимодействие облучающего и вторичного электромагнитных полей приводит к искажению структуры суммарного электромагнитного поля вблизи металлических поверхностей подвижных объектов во время стоянки, но никакие дополнительные спектральные составляющие при этом не возникают.

2.2. ОДИНОЧНЫЙ ПЕРЕМЕННЫЙ КОНТАКТ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

Практический интерес представляет анализ структуры электромагнитного поля вторичного излучения, когда сопротивление облучаемого проводящего тела изменяется по какому-то закону, описываемому функцией $z(t)$. Реально изменение сопротивления может происходить при контактировании различных частей и элементов корпуса подвижных объектов во время движения. В этом случае могут образовываться системы проводящих тел из двух и более элементов, между которыми будет существовать переменное во времени контактное сопротивление. Причем изменение сопротивления облучаемых контактирующих систем может происходить как за счет переменного во времени контактного сопротивления между соприкасающимися элементами корпуса, так и за счет изменения числа элементов, составляющих облучаемую контактирующую систему. Пусть в электромагнитном поле какого-то излучателя находится контактная пара, образованная из двух проводников произвольной конфигурации (рис. 2.3).

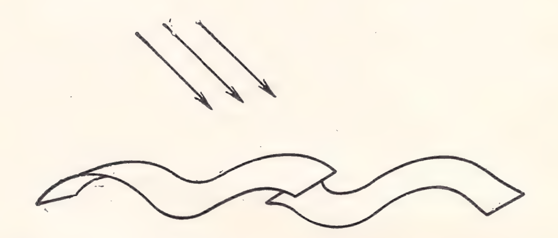


Рис. 2.3. Контактирующая система из двух элементов, облучаемая электромагнитным полем

Внутренние сопротивления элементов контактной пары обозначим соответственно через $z_{эл_1}$ и $z_{эл_2}$, а изменение контактного сопротивления в процессе контактирования элементов — через $z_к(t)$.

Заменим данную контактную пару эквивалентным проводником с внутренним сопротивлением

$$z(t) = z_{эл_1} + z_{эл_2} + z_к(t).$$

Под действием внешнего облучающего электромагнитного поля на эквивалентном проводнике наведется ЭДС со спектральной структурой облучающего поля.

Предположим, что излучатель излучает узкополосный сигнал, образованный путем модуляции гармонического сигнала по амплитуде и по фазе. Тогда напряжение, наводимое на эквивалентном проводнике, можно записать в виде

$$u(t) = U(t)\cos[\omega_0 t + \Phi(t) + \varphi_0],$$

где $U(t)$ — амплитуда напряжения, определяемая законом амплитудной модуляции облучающего электромагнитного поля;

ω_0 — круговая частота облучающего электромагнитного поля;

$\Phi(t)$ — закон фазовой модуляции;

φ_0 — начальная фаза.

Величину тока проводимости в эквивалентном проводнике можно вычислить по формуле

$$i_{\text{к}}(t) = \frac{u(t)}{z(t)} = u(t)\ y(t), \qquad (2.1)$$

где $y(t) = 1/z(t)$ — проводимость эквивалентного проводника.

Запишем $u(t)$ и $y(t)$ в комплексной форме

$$u(t) = Re\{\dot{U}(t)\,e^{j(\omega_0 t + \varphi_0)}\};$$

$$y(t) = Re\{Y(t)\,e^{j\varphi(t)}\},$$

где $\dot{U}(t) = U(t)e^{j\Phi(t)}$ — комплексная огибающая напряжения, в которой заключена информация о модулированном сигнале, передаваемом облучающим электромагнитным полем [8].

Тогда ток проводимости в эквивалентном проводнике можно записать в виде

$$i_{\text{к}}(t) = Re\{\dot{U}(t)\,Y(t)\,e^{j\varphi(t)}e^{j(\omega_0 t + \varphi_0)}\} =$$
$$= U(t)\,Y(t)\cos[\omega_0 t + \Phi(t) + \varphi_0 + \varphi(t)]. \qquad (2.2)$$

Из выражения (2.2) следует, что спектр тока отличен от спектра облучающего электромагнитного поля. Он содержит дополнительные спектральные составляющие, обусловленные изменением контактного сопротивления.

Произошли амплитудные и фазовые искажения, и, следовательно, электромагнитное поле вторичного излучения переменного контакта будет существенно отличаться по спектральной структуре от первоначального облучающего поля.

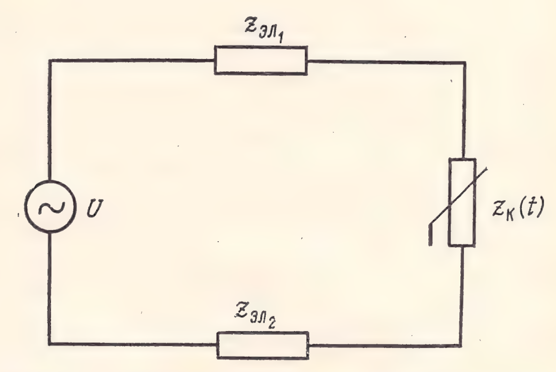


Рис. 2.4. Эквивалентная схема облучаемого переменного контакта

Представим ток $i_к(t)$ в виде

$$i_к(t) = Re\left\{\dot{I}_к(t)\, e^{j(\omega_0 t + \varphi_0)}\right\}, \qquad (2.3)$$

где $\dot{I}_к(t) = \dot{U}(t)\, Y(t)\, e^{j\varphi(t)}$ — комплексная огибающая тока в облучаемой контактной паре.

Из сравнения выражений (2.2) и (2.3) следует, что паразитная амплитудно-фазовая модуляция, происходящая при облучении переменного контакта электромагнитным полем, определяется функцией

$$\dot{Y}(t) = Y(t)\, e^{j\varphi(t)}.$$

Эта функция полностью характеризуется изменением комплексной проводимости переменного контакта, а дополнительные спектральные составляющие, возникающие в электромагнитном поле вторичного излучения, образуют **контактные помехи.**

Переменный контакт в электромагнитном поле можно рассматривать как высокочастотный генератор ЭДС с внутренним сопротивлением $z_{эл} = z_{эл_1} + z_{эл_2}$, работающий на переменную нагрузку $z_к(t)$ (рис. 2.4).

Обозначим через E_2 напряженность электромагнитного поля вторичного излучения, вызванного протеканием высокочастотного тока через переменное контактное сопротивление. Для любого типа излучателя справедлива формула [7]

$$E_2 = \frac{\kappa(\omega)}{f(R)}\, i_к(t)\, F(\Delta, \varphi), \qquad (2.4)$$

где $\kappa(\omega)$ — коэффициент, учитывающий условия распространения электромагнитных волн;

$f(R)$ — функция расстояния;

$F(\Delta, \varphi)$ — функция диаграммы направленности облучаемого переменного контакта по азимутальному и зенитному углам, зависящая от размеров и конфигурации элементов, составляющих контактирующую систему.

Выражение (2.4) можно записать в виде

$$E_2 = F_2(R, \Delta, \varphi, \omega)\, i_к(t). \qquad (2.5)$$

Аналогично можно записать связь между напряженностью облучающего электромагнитного поля E_1 и напряжением, наводимым на переменном контакте:

$$U(t) = F_1(R, \Delta, \varphi, \omega)\, E_1. \qquad (2.6)$$

В соотношениях (2.5) и (2.6) функции $F_1(R, \Delta, \varphi, \omega)$ и $F_2(R, \Delta, \varphi, \omega)$ не зависят от параметров облучающего электромагнитного поля.

С учетом (2.1) связь между напряженностями E_2 и E_1 выразится в виде

$$E_2 = E_1 F_1(R, \Delta, \varphi, \omega)\, F_2(R, \Delta, \varphi, \omega)\, y(t). \qquad (2.7)$$

Из независимости функций $F_1(R, \Delta, \varphi, \omega)$, $F_2(R, \Delta, \varphi, \omega)$ от напряженности следует, что линейность преобразования (т. е. возможность описания процессов в установившемся режиме с помощью линейных дифференциальных уравнений) целиком определяется характером зависимости $y(t)$ от напряжения, наводимого на облучаемом переменном контакте.

2.3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕМЕННОГО КОНТАКТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Контактное сопротивление $z_к$, обусловливающее падение напряжения на стыке двух соприкасающихся проводников, состоит в общем случае из двух составных частей [13, 18]:

$$z_к = z_п + z_{пер} = R_к + jX_к, \tag{2.8}$$

где $z_п$ — сопротивление поверхностной пленки;

$z_{пер}$ — переходное сопротивление.

Первая составляющая $z_п$ определяется сопротивлением поверхностных пленок окислов, покрывающих контактирующие проводники и препятствующих протеканию тока через контактный промежуток.

Относительно природы второй составляющей $z_{пер}$ до настоящего времени нет единого мнения. Согласно теории контактного сопротивления Хольма Р. [18], получившей наибольшее распространение, $z_{пер}$ образуется за счет стягивания линий тока к отдельным точкам (α-пятнам) соприкасания двух контактирующихся поверхностей. Известно также объяснение возникновения $z_{пер}$ сопротивлением микровыступов, проводящих электрический ток [9].

Активная составляющая контактного сопротивления $R_к$ определяет количество тепла, выделяемого на контактном переходе при прохождении тока. Реактивная составляющая обусловлена индуктивностью и емкостью переходной зоны переменного контакта.

Индуктивное сопротивление вызывается разностью энергий магнитного поля ($W_1 — W_2$) на краях контактирующихся элементов и на контактной перемычке за счет стягивания линий тока к α-пятнам проводимости. Величина $L_к$ может быть подсчитана по формуле [18]

$$L_к = \frac{2\,(W_1 - W_2)}{i_к^2},$$

где $i_к$ — ток через контактную перемычку.

Вследствие шероховатости поверхностей контактирующихся проводников соприкасание их происходит не по всей площади, а только по отдельным участкам с чисто металлической или квазиметаллической проводимостью. Таким образом, рядом с проводящими участками обра-

зуются области с повышенной емкостью. Емкость переходной зоны определяется также конфигурацией контактных поверхностей, чистотой их обработки и степенью прижимного усилия. В общем случае емкость переходной зоны можно найти по формуле

$$C_{к} = \varepsilon_0 \int_S \frac{dS}{d},$$

где ε_0 — диэлектрическая постоянная среды;
d — расстояние между контактными поверхностями;
S — площадь контактирующихся поверхностей.

Полная картина явлений при контактировании гораздо сложнее. По результатам последних исследований, контактная проводимость объясняется наличием дополнительных явлений холодной эмиссии, термоэмиссии, газового разряда, электрохимической и термоэдс [9].

В процессе контактирования величина $z_{к}$ меняется в широких пределах в зависимости от многих факторов: температуры окружающей среды, давления, с которым прижимаются друг к другу соприкасающиеся элементы, толщины поверхностной пленки окисла и ее электрических характеристик и т. д. Поэтому точный расчет закономерностей и пределов изменения значений $R_{к}$, $L_{к}$, $C_{к}$ при контактировании элементов конструкции подвижных объектов представляет крайне сложную задачу, не поддающуюся точному математическому определению. Имеющиеся в настоящее время аналитические формулы для определения значений $R_{к}$, $L_{к}$, $C_{к}$ получены для идеализированных условий переключения контактов с заданными геометрическими формами при ряде ограничений по состоянию поверхности, контактному давлению соприкасающихся элементов, температуре и составу среды. Интересующемуся читателю можно рекомендовать работу [9]. Значения составляющих контактного сопротивления реальных переменных контактов подвижного объекта могут принимать любые значения от крайне малых до бесконечно больших.

Полная эквивалентная схема контактного сопротивления представлена на рис. 2.5. На низких частотах, в диапазоне работы электрических устройств, низкочастотной аппаратуры автоматики и телемеханики, модуль контактного сопротивления определяется в основном величиной своей активной составляющей, особенно в случае раз-

рывных контактов. В этом случае контактное сопротивление можно считать чисто активным сопротивлением. На очень высоких частотах (порядка сотен МГц) емкость переходной зоны шунтирует активное и индуктивное со-

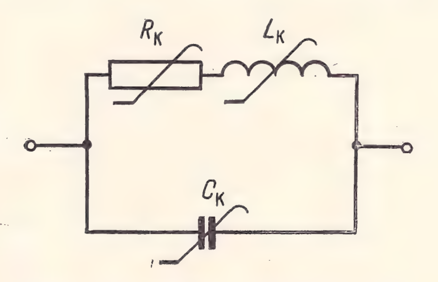


Рис. 2.5. Полная эквивалентная схема контактного сопротивления

противления. Эквивалентная схема контактного сопротивления при переключениях элементов с достаточно большими поверхностями контактирования в этом случае может быть представлена в виде переменной емкости. В диапазонах от ОНЧ до ОВЧ необходимо учитывать все составляющие контактного сопротивления.

Полное сопротивление контактного перехода вычисляется по формуле

$$z_к = \frac{R_к}{(1-\omega^2 R_к C_к)^2 + \omega^2 R_к^2 C_к^2} + j\frac{\omega L_к(1-\omega^2 L_к C_к) - \omega R_к^2 C_к}{(1-\omega^2 L_к C_к)^2 + \omega^2 R_к^2 C_к^2}. \quad (2.9)$$

С точки зрения оценки линейности преобразования напряженности электромагнитного поля важно оценить зависимость $z_к$ от напряжения, приложенного к соприкасающимся проводникам, которое, в свою очередь, связано с величиной электрической напряженности облучающего электромагнитного поля линейной зависимостью по формуле (2.6).

Анализ зависимости $z_к = f(U)$ проведем отдельно для каждой из составляющих комплексного сопротивления $z_к$.

Зависимость активной составляющей контактного сопротивления $R_к$ от напряжения для идеального контакта

(т. е. без поверхностной окисной пленки) приведена на рис. 2.6 (кривая *а*) [18].

С повышением напряжения возрастает температура на контактном стыке, а вместе с ней сопротивление $R_к$. Температурный режим локального перегрева в электри-

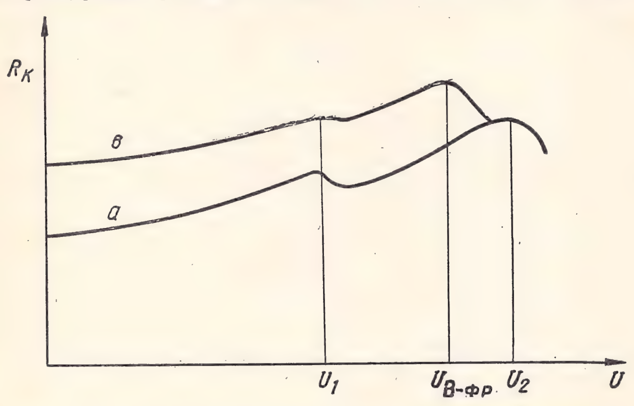


Рис. 2.6. Зависимость активной составляющей контактного сопротивления от напряжения, прикладываемого к контактному стыку

ческих контактах устанавливается почти мгновенно (через $1 \cdot 10^{-4}$—$5 \cdot 10^{-3}$ с после включения напряжения). Величина $R_к$ с увеличением напряжения растет по почти линейному закону до значения $U = U_1$, соответствующего началу процесса рекристаллизации металла контактирующихся элементов. При этом сопротивление $R_к$ несколько уменьшается за счет увеличения эффективной площади соприкосновения из-за уменьшения прочности металла.

Дальнейший подъем сопротивления происходит по несколько более пологой зависимости, так как при $U > U_1$ наблюдается явление текучести металла и, как следствие этого, некоторое увеличение контактной поверхности. Начиная с $U = U_2$, металл плавится и наблюдается резкое уменьшение контактного сопротивления.

Характер кривой сохраняет свою форму и в случае, когда контактирующие поверхности содержат участки с плохо проводящей поверхностной пленкой (рис. 2.6, кривая *в*).

Начальное значение $R_к$ сдвинуто выше, но до напряжения U_1 кривая более плавная, так как поверхностная

пленка характеризуется отрицательным температурным коэффициентом. В области напряжений $U > U_1$ даже при температуре рекристаллизации материала контактирующихся элементов площадь соприкосновения почти не увеличивается, так как температура рекристаллизации окислов выше, чем для чистых металлов. Поэтому изгиб кривой на этом участке почти сохраняет свою монотонность.

При дальнейшем повышении напряжения до $U = U_{\text{В-фр}} < U_2$ происходит резкое уменьшение контактного сопротивления. Это явление, получившее название В-фриттинга, характеризуется пробоем диэлектрического слоя поверхностной пленки при напряженностях поля в контактном промежутке порядка 10^6—10^7 В/см [18].

После разрушения пленки контактное сопротивление уменьшается до величины сопротивления идеального контакта и при дальнейшем повышении напряжения совпадает с его графиком.

Если толщина окисной пленки составляет несколько сот ангстрем, напряжение фриттинга может превысить напряжение плавления металла — U_2. В этом случае говорят об А-фриттинге.

Из графика следует, что в широком диапазоне напряжений от 0 до $U_{\text{В-фр}}$ активная составляющая контактного сопротивления растет почти линейно в зависимости от разности приложенных потенциалов и с допустимой погрешностью его на этом участке можно считать линейным.

Очевидно, линейным можно считать на этом интервале изменение емкости и индуктивности переменного контакта.

Индуктивность определяется стягиванием линий тока к α-пятнам, т. е. в конечном счете зависит от эффективной площади контактирования. Из проведенного анализа следует, что существенного изменения эффективной площади контактирования до В-фриттинга окисной пленки не наблюдается.

Емкость переходной зоны определяется конфигурацией поверхностей контактирующихся элементов. Изменение состояния микровыступов начинается лишь при напряжениях выше U_1, однако существенное изменение емкости происходит лишь при напряжениях, превышающих напряжение В-фриттинга. Из-за пробоя поверхност-

ной пленки окислов происходит резкое изменение диэлектрической постоянной, а при дальнейшем повышении напряжения возможно возникновение электрической дуги, сопровождающейся изменением конфигурации поверхностей и диэлектрических характеристик среды в переходной зоне.

Эквивалентная схема внутреннего сопротивления элементов контактной пары может быть представлена в виде последовательного соединения линейных активного и индуктивного сопротивлений

$$z_{эл} = R_{эл} + j\omega L_{эл}. \qquad (2.10)$$

Таким образом, если в процессе контактирования проводников в электромагнитном поле наводимое напряжение, приложенное к контактному промежутку, не превышает $U_{В\text{-}фр}$, процесс преобразования электромагнитного поля можно считать с допустимой погрешностью линейным. Линейная интерпретация явлений, сопровождающих процессы, происходящие при облучении переменных контактов электромагнитным полем, позволяет использовать для спектрального анализа контактных помех хорошо разработанный математический аппарат теории преобразования сигналов линейными инерционными параметрическими системами.

2.4. ДУГОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ОБЛУЧАЕМЫХ ПЕРЕМЕННЫХ КОНТАКТАХ

Как было показано выше, зависимость контактного сопротивления от напряженности облучающего электромагнитного поля можно аппроксимировать линейной функцией лишь в определенных пределах. В облучающих электромагнитных полях, обеспечивающих падение напряжения на контактном стыке выше $U_{В\text{-}фр}$, переменный контакт проявляет себя существенно нелинейным элементом.

Нарушение связей решетки окисной пленки, которым начинается фриттинг, соответствует начальной стадии пробоя диэлектрического слоя между контактирующими элементами, т. е. стадии дугообразования [18].

Для развития дуги между контактами необходимо одновременное выполнение двух условий:

$$U_m > U_{\min}, \quad I_m > I_{\min}, \qquad (2.11)$$

где U_m, I_m — соответственно амплитуда наводимого напряжения и тока;

U_{min}, I_{min} — соответственно минимальные значения напряжения и тока, необходимые для возникновения дуги.

Минимальное напряжение дуги U_{min} определяется по формуле [18]

$$U_{min} = V_i + W_i, \tag{2.12}$$

где V_i — энергия ионизации металла контактирующихся элементов;

W_i — работа выхода электронов.

Для всех металлов и сплавов справедливо соотношение

$$U_{min} > U_2 > U_{В\text{-}фр}. \tag{2.13}$$

В случае контактирования элементов из различных металлов U_{min}, I_{min} полагаются равными меньшим значениям из двух металлов (см. табл.).

Значения U_{min} и I_{min} для некоторых металлов и сплавов [18]

Параметры	Материал					
	железо	медь	цинк	серебро	платина	сталь
U_{min}, В	13—15	13	10,5	12	17,5	15
I_{min}, А	0,35—0,55	0,43	0,1	0,4	0,9	0,5

Вопросы взаимосвязи между дугой, возникающей при облучении переменных контактов высокочастотным электромагнитным полем, и спектром вторичного излучения от нее являются неизученными до настоящего времени. Электрическая дуга представляет чрезвычайно сложный физический процесс, отличающийся быстротечностью и многообразием происходящих явлений. Наиболее полно в настоящее время изучены дуговые процессы в электрических цепях постоянного тока и в низкочастотных электрических цепях переменного тока. Изучение дуговых процессов в переменных контактах, облуча-

емых высокочастотным электромагнитным полем, не вышло за рамки экспериментальных исследований.

С точки зрения возможности возникновения электрической дуги наиболее опасным является размыкание переменных контактов. На высоких частотах облучающего электромагнитного поля индуктивная составляющая внутреннего сопротивления элементов переменного контакта имеет достаточно большое значение и в начальный период размыкания к контактному промежутку прикладывается напряжение

$$U = U_{н} + E_{си},$$

где $U_{н}$ — напряжение за счет ЭДС, наводимой на переменном контакте, облучаемом электромагнитным полем;

$E_{си}$ — ЭДС самоиндукции.

$$E_{си} = L_{эл} \frac{di_{к}}{dt},$$

где $L_{эл}$ — индуктивность элементов контактной пары.

При размыкании вначале уменьшается площадь соприкосновения контактных поверхностей, вследствие чего возрастает контактное сопротивление. Ток разогревает малый участок контактной поверхности до температуры испарения металла. В микропромежутке создается электрическое поле с напряженностью порядка 10^6—10^7 В/см [18], и в момент разрушения жидкого мостика металла между расходящимися поверхностями возникает электрическая дуга.

Начальный период развития электрической дуги сопровождается резким нарастанием тока через контактный промежуток. Скорость изменения тока достигает 10^{10} А/с [13], далее возникает колебательный процесс сложной формы.

Если справедливо на высоких частотах излучения радиопередающих средств подвижных узлов связи основное свойство электрической дуги переменного тока, то дуга должна гаснуть при каждом прохождении синусоиды питающего тока через нулевой уровень. Когда расхождение контактирующихся элементов происходит с малой скоростью, возможны повторные зажигания дуги и на следующих полупериодах синусоиды питающего тока. Экспериментальные исследования авторов и данные за-

рубежных источников [19] подтверждают правильность этой гипотезы: спектр электрической дуги на переменном контакте, облучаемом высокочастотным электромагнитным полем, представляет гауссовскую кривую, центрированную относительно частоты излучения облучающего передатчика.

Длительность горения дуги определяется силой протекающего тока, формой контактирующих элементов, их материалом, скоростью размыкания. Дуга гаснет при расхождении контактирующихся поверхностей на расстояние более 10^{-4} см.

Таким образом, протекание процессов в электрической дуге определяется множеством факторов, что делает теоретический анализ ее спектра практически невозможным. Экспериментальные исследования свидетельствуют о том, что на некоторых частотах спектр помехи от дуги может иметь максимумы. Наличие их объясняется резонансными свойствами как внутреннего сопротивления элементов контактной пары, так и контактного сопротивления.

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОНТАКТНЫХ ПОМЕХ

3.1. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ОБЛУЧАЕМОГО ПЕРЕМЕННОГО КОНТАКТА В ВИДЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ИНЕРЦИОННОГО ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКА

Как было показано выше, при определенных условиях облучаемый переменный контакт можно рассматривать как линейное инерционное устройство с параметрами,

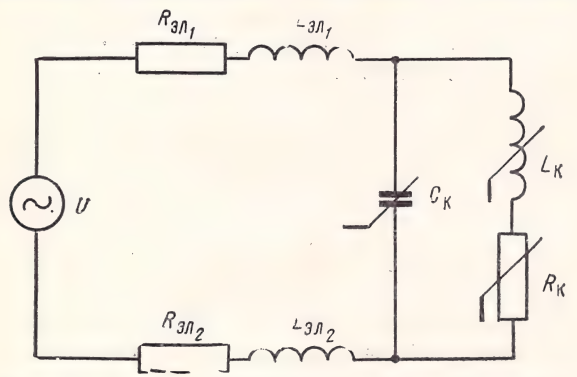


Рис. 3.1. Полная эквивалентная схема облучаемого линейного переменного контакта как источника контактных помех

управляемыми некоторым случайным модулирующим процессом (переключениями, вибрацией, тряской и т. д.) изменяющим амплитуду и частотно-фазовые соотношения высокочастотного тока проводимости, наведенного внешним электромагнитным полем.

Полная эквивалентная схема облучаемого переменного контакта как источника контактных помех может быть представлена в виде, изображенном на рис. 3.1.

Анализ преобразования спектра электромагнитного поля, происходящего при облучении линейного переменного контакта, можно провести решением линейного стохастического дифференциального уравнения при определенных начальных и граничных условиях.

Зависимость между напряженностями облучающего электромагнитного поля $e_1(t)$ и поля вторичного излучения $e_2(t)$ может быть записана через линейные дифференциальные операторы A_t и B_t [10]:

$$A_t e_1(t) = B_t e_2(t),$$

где

$$A_t = \sum_{к=0}^{n} a_к(t) \frac{d^к}{dt^к};$$

$$B_t = \sum_{к=0}^{m} b_к(t) \frac{d^к}{dt^к}, \; m \leqslant n.$$

При этом всегда предполагается, что случайный процесс, описывающий изменение сопротивления облучаемого переменного контакта во времени, дифференцируем в среднеквадратическом. Однако определение в явном виде импульсной переходной функции линейного параметрического инерционного устройства $h(t, \tau)$ (т. е. функции Грина линейного стохастического дифференциального уравнения) в нашем случае является весьма трудной задачей.

Возникновение контактных помех может быть приближенно представлено в виде преобразования напряженности электромагнитного поля некоторым гипотетическим четырехполюсником с комплексной передаточной функцией $\dot{H}(j\omega, t)$ (рис. 3.2). Передаточная функция $\dot{H}(j\omega, t)$ связана с импульсной переходной функцией выражением [4]

$$\dot{H}(j\omega, t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t, \tau) e^{-j\omega\tau} d\tau.$$

Напряженность электромагнитного поля вторичного излучения переменного контакта может быть определена по формуле [19]

$$e_2(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{S}_{e_1}(\omega)\, \dot{H}(j\omega,\ t)\, e^{j\omega,\, t}\, dt, \qquad (3.1)$$

где $\dot{S}_{e_1}(\omega)$ — энергетический спектр облучающего электромагнитного поля.

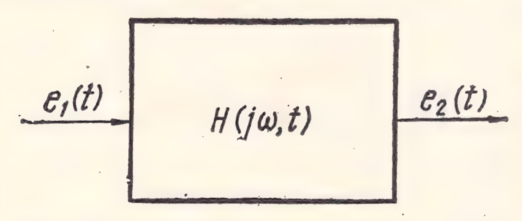


Рис. 3.2. Представление облучаемого переменного контакта в виде линейного параметрического инерционного четырехполюсника

В дальнейшем при анализе спектральных характеристик преобразованного переменным контактом электромагнитного поля будем использовать в качестве характеристики параметрического четырехполюсника только его комплексную передаточную функцию

$$\dot{H}(j\omega,\ t) = H(\omega,\ t)\, e^{j\varphi(\omega,\ t)}, \qquad (3.2)$$

где $H(\omega,\ t)$ — модуль передаточной функции;

$\varphi(\omega,\ t)$ — аргумент передаточной функции.

Рассмотрим предельный случай: в моногармоническом электромагнитном поле излучателя с частотой ω_0 находится периодически переключающийся переменный контакт. Задача в подобной постановке впервые рассматривалась Федяевым Н. С.

Задача эта представляет не только теоретический интерес. Периодическое изменение контактного сопротивления наблюдается и на практике. Типичным примером является переменный контакт между колесами вагонов и стыками рельсов при установившейся скорости движения железнодорожного состава. С периодическим изменением контактного сопротивления с частотой, близкой к собственной частоте механических конструкций,

происходят колебания также корпусов подвижных объектов вокруг осей симметрии.

Очевидно, что изменение контактного сопротивления по периодическому закону приводит также к периодическому закону изменения во времени передаточной функции $\dot{H}(j\omega, t)$.

Пусть основная частота изменения передаточной функции $\dot{H}(j\omega, t)$ равна $\Omega = 1/T$, где T — период изменения контактного сопротивления. Разложим функцию $\dot{H}(j\omega, t)$ в ряд Фурье, при этом, естественно, полагается, что функция $\dot{H}(j\omega, t)$ удовлетворяет условиям Дирихле.

$$\dot{H}(j\omega, t) = \dot{H}_0(j\omega) + \sum_{n \geqslant 1} \dot{H}_n(j\omega) \cos(n\Omega t + \psi_n). \quad (3.3)$$

Напряженность облучающего электромагнитного поля зададим в виде

$$e_1(t) = E_{1m} \cos \omega_0 t = E_{1m} Re\left[e^{j\omega_0 t}\right].$$

Раскроем комплексные выражения:

$$\dot{H}_0(j\omega) = H_0(\omega)\, e^{j\varphi_0},\ \dot{H}_n(j\omega) = H_n(\omega)\, e^{j\varphi_n}.$$

Напряженность электромагнитного поля вторичного излучения будет определяться формулой

$$e_2(t) = E_{1m} Re\left[\dot{H}(j\omega, t) = E_{1m}\left\{H_0(\omega)\cos(\omega_0 t + \varphi_0) + \right.\right.$$
$$+ \frac{1}{2}\sum_{n \geqslant 1} H_n(\omega_0)\left[\cos < (\omega_0 + n\Omega)t + \psi_n + \varphi_n > + \right.$$
$$\left.\left. + \cos < (\omega_0 - n\Omega)t + \varphi_n - \psi_n >\right]\right\}. \quad (3.4)$$

Анализ формулы (3.4) показывает, что напряженность поля вторичного излучения облучаемого переменного контакта можно записать в виде суммы двух составляющих

$$e_2(t) = e_2'(t) + e_2''(t). \quad (3.5)$$

Составляющая

$$e_2'(t) = E_{1m} H_0(\omega) \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$$

представляет напряженность облучающего электромагнитного поля с уменьшенной в $H_0(\omega)$ раз амплитудой и претерпевшей сдвиг на величину φ_0.

Вторая составляющая

$$e_2''(t) = E_{1m}\left\{\sum_{n \geqslant 1} H_n(\omega)\left[\cos\langle(\omega_0 + n\Omega)t + \varphi_n + \psi_n\rangle + \right.\right.$$
$$\left.\left. + \cos\langle(\omega_0 - n\Omega)t + \varphi_n - \psi_n\rangle\right]\right\}$$

представляет искажение напряженности электромагнитного поля при облучении периодически изменяющегося контакта и характеризует возникающие при этом контактные помехи.

Энергетический спектр поля вторичного излучения $S_{e_2}(\omega)$ можно представить в виде суммы δ-функций:

$$S_{e_2}(\omega) = \pi\left[E_{1m}H_0(\omega)\right]^2\left[\delta(\omega - \omega_0) + \delta(\omega + \omega_0)\right] +$$
$$+ \frac{\pi}{2}\sum_{n \geqslant 1}\left[E_{1m}H_n(\omega)\right]^2\{\delta(\omega + \omega_0 + n\Omega) +$$
$$+ \delta(\omega + \omega_0 - n\Omega) + \delta(\omega - \omega_0 - n\Omega) +$$
$$+ \delta(\omega - \omega_0 + n\Omega)\}. \quad (3.6)$$

Из полученного выражения следует, что спектр электромагнитного поля вторичного излучения переменного контакта, переключающегося по периодическому закону, содержит в своем составе составляющую на частоте облучающего поля и дополнительные составляющие на частотах $\omega_0 \pm n\Omega$.

Спектр контактных помех всегда шире спектра облучающего электромагнитного поля, причем полоса частот, занятых контактными помехами, расширяется при увеличении частоты переключения переменного контакта.

3.2. СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНТАКТНЫХ ПОМЕХ В СЛУЧАЕ ЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ ОБЛУЧАЕМОГО ПЕРЕМЕННОГО КОНТАКТА

Все переменные контактные пары, образующиеся при движении подвижных объектов, по характеру изменения во времени контактного сопротивления можно разделить на две большие группы:

— контакты с трением качения и скольжения;

— случайно-переключающиеся разрывные контакты.

К первой группе переменных контактов относятся контакты между элементами конструкции подвижных объектов, имеющими неплотные механические сочленения

или допускающими по условиям эксплуатации небольшие взаимные перемещения. Обычно такие соединения образуются между элементами конструкции, неплотно соединенными болтами, винтами, а также в результате частичного расхождения сварных швов. К этой же группе относятся переменные контакты между осью и вращающимися частями (винтами, колесами, лопастями), контакты между колесами и рельсами железнодорожных вагонов, грузовых тележек и тому подобное.

Вместо кажущегося постоянного контакта между такими элементами конструкции на самом деле при движении подвижных объектов существует неустойчивый контакт, складывающийся из множества кратковременно прерывающихся элементарных контактов через α-пятна. Причинами изменений числа α-пятен, образующих эффективную площадь контактирования в различные моменты времени, являются неизбежные отклонения формы, установленных размеров, профиля и чистоты обработки поверхностей контактирующихся элементов. Неустойчивый характер контакта между такими элементами особенно ясно проявляется с увеличением скорости движения из-за вибрации и тряски.

Функция изменения контактного сопротивления во времени для переменных контактов первой группы является непрерывной. Дискретность изменения числа α-пятен, образующих эффективную площадь контактирования в последовательные моменты времени, настолько мала и настолько велико их число, что изменение контактного сопротивления во времени можно считать непрерывной случайной величиной.

Вторую группу переменных контактов образуют элементы конструкции подвижных объектов, контактные сопротивления между которыми при движении изменяются в широком динамическом диапазоне от совсем незначительной величины при замыкании до бесконечно большого значения при размыкании. Эту группу контактов составляют в основном элементы конструкции, между которыми нет жестких механических связей, но которые имеют возможность соприкасаться во время движения подвижного объекта. Такой же контакт может существовать между неплотно соединенными элементами конструкции в условиях сильной вибрации, когда резкие толчки вызывают скачкообразные изменения контактного сопротивления.

Описание изменения контактного сопротивления переменных контактов второй группы можно провести с помощью случайной импульсной последовательности.

При анализе спектра электромагнитного поля контактных помех будем полагать, что случайные изменения модуля $H(\omega, t)$ и аргумента $\varphi(\omega, t)$ передаточной функции четырехполюсника образуют стационарный в широком смысле процесс. Кроме того, считаем, что интервал корреляции функции $\dot{H}(j\omega, t)$ значительно превосходит период изменения частоты облучающего электромагнитного поля. Это условие практически всегда выполняется.

Также считаем, что при облучении переменных контактов моногармоническим полем выполняются условия

$$\left.\begin{aligned} & H(\omega, t) = H(\omega_0, t); \\ & \frac{d\varphi(\omega, t)}{d\omega} = \varphi(\omega_0, t) + \varphi'(\omega_0, t)(\omega - \omega_0), \end{aligned}\right\} \qquad (3.7)$$

где ω_0 — частота облучающего поля.

Это означает, что эквивалентный четырехполюсник не вносит искажений в форму входного сигнала. Передаточная функция линейного четырехполюсника, интерпретирующего облучаемый переменный контакт, полагается не зависящей от параметров модуляции облучающего электромагнитного поля.

Контактные помехи, возникающие при облучении переменного контакта, можно классифицировать по виду искажений электромагнитного поля. В зависимости от передаточной функции $\dot{H}(j\omega, t)$ можно различать следующие виды паразитной модуляции электромагнитного поля:

— амплитудную;
— фазовую;
— амплитудно-фазовую.

При чисто амплитудной модуляции вторичное электромагнитное поле можно представить в виде продукта преобразования облучающего электромагнитного поля четырехполюсником с передаточной функцией $\dot{H}(j\omega, t) = H(t)$. Подобное преобразование может происходить при облучении переменных контактов низкочастотным электромагнитным полем, а также при облучении точечных переменных контактов, когда реактивная составляю-

щая контактного сопротивления намного меньше его активной составляющей.

Случаю чисто фазовых искажений соответствует облучение переменных контактов с передаточной функцией эквивалентного четырехполюсника $\dot{H}(j\omega, t) = e^{j\varphi(t)}$. Реально такое преобразование может происходить при облучении переменных контактов электромагнитным полем на очень высоких частотах, когда изменение модуля контактного сопротивления полностью определяется изменением его емкостной составляющей.

Наиболее общим случаем модуляции, происходящей при облучении переменного контакта, является амплитудно-фазовая, причем между изменениями амплитуды и фазы может существовать функциональная связь

$$\dot{H}(j\omega, t) = H(\omega, t)\, e^{j\varphi(\omega, t)} = H[\varphi(\omega, t)]\, e^{j\varphi(\omega, t)}. \quad (3.8)$$

Спектральную структуру контактных помех, возникающих при облучении переменных контактов, рассмотрим применительно к проведенному выше разделению их по группам.

3.2.1. Контакты с трением качения и скольжения

Рассмотрим случай облучения таких переменных контактов моногармоническим полем с частотой ω_0 и со случайной фазой ϕ, равномерно распределенной в пределах от $-\pi$ до $+\pi$.

Случайность распределения фазы напряженности облучающего электромагнитного поля не оказывает влияния на вид его корреляционной функции, которая равна [4]

$$B_{e_1}(\tau) = \frac{E_{1m}^2}{2} \cos \omega_0 \tau, \quad (3.9)$$

где E_{1m} — амплитуда напряженности.

Назовем моментной функцией четырехполюсника автокорреляционную функцию случайного процесса, характеризующего изменение во времени параметров четырехполюсника [10]:

$$\dot{B}_H(t, \tau) = m_1 \left\{ \dot{H}(j\omega, t), \overset{*}{H}(j\omega, t + \tau) \right\}, \quad (3.10)$$

где m_1 — знак математического ожидания;

$\overset{*}{H}(j\omega, t+\tau)$ — комплексно-сопряженная передаточная функция.

Учитывая формулу (3.2), можно записать

$$\dot{B}_H(t, \tau) = m_1 \left\{ H(\omega, t), H(\omega, t+\tau)\, e^{j[\varphi(t) - \varphi(t+\tau)]} \right\},$$

а для случая функциональной связи вида (3.8) выражение для определения $\dot{B}_H(\tau)$ примет вид

$$\dot{B}_H(t, \tau) = m_1 \left\{ H[\varphi(\omega, t)],\ H[\varphi(\omega, t+\tau)]\, e^{j[\varphi(t) - \varphi(t+\tau)]} \right\}.$$

Непрерывный характер изменения контактного сопротивления у контактов с трением качения и скольжения обусловливает справедливость представления $\dot{H}(j\omega, t)$ в виде стационарного случайного процесса. В этом случае передаточная функция $\dot{H}(j\omega, t)$ может быть записана в виде суммы двух составляющих

$$\dot{H}(j\omega, t) = \dot{H}_0(j\omega) + \Delta\dot{H}(j\omega, t), \qquad (3.11)$$

где $\dot{H}_0(j\omega)$ — постоянная комплексная величина;

$\Delta\dot{H}(j\omega, t)$ — флюктуирующая часть передаточной функции.

Тогда моментную функцию четырехполюсника можно представить как

$$\dot{B}_H(t, \tau) = \dot{B}_{H_0}(\tau) + \dot{B}_{\Delta H}(t, \tau). \qquad (3.12)$$

Предположим, что изменения $\Delta\dot{H}(j\omega, t)$ образуют флюктуационный процесс с нормальным законом распределения и с дисперсией изменения модуля $\Delta H(\omega, t)$, равной $\sigma^2_{\Delta H}$. Корреляционная функция такого процесса может быть записана в виде [1]

$$B_{\Delta H}(\tau) = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} Re\left[\dot{B}_{\Delta H}(t, \tau)\right] d\tau = \sigma^2_{\Delta H} e^{-k|\tau|}, \qquad (3.13)$$

где κ — коэффициент, характеризующий быстроту убывания корреляционной связи между значениями $\Delta H(\omega, t)$ в моменты t и $t+\tau$ при увеличении τ.

Учитывая, что постоянной составляющей $\dot{H}(j\omega)$ соответствует корреляционная функция $B_{H_0}(\tau) = H_0^2(\omega)$, мо-

ментную функцию четырехполюсника можно определить по формуле

$$B_H(\tau) = H_0^2(\omega) + \sigma_{\Delta H}^2 e^{-k|\tau|}. \qquad (3.14)$$

Из условий стационарности в широком смысле и статистической независимости закона изменения передаточной функции $\dot{H}(j\omega, t)$ от облучающего поля следует, что корреляционная функция напряженности электромагнитного поля вторичного излучения будет равна произведению корреляционной функции облучающего поля на моментную функцию четырехполюсника

$$B_{e_2}(\tau) = B_{e_1}(\tau) B_H(\tau). \qquad (3.15)$$

Тогда

$$B_{e_2}(\tau) = \frac{E_{1m}^2}{2} \left[H_0^2(\omega) + \sigma_{\Delta H}^2 e^{-k|\tau|}\right] \cos \omega_0\tau. \qquad (3.16)$$

Энергетический спектр поля контактных помех можно найти по формуле

$$S_{e_2}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} B_{e_2}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau =$$

$$= \frac{\pi}{2} E_{1m}^2 H_0^2(\omega) \left[\delta(\omega - \omega_0) + \delta(\omega + \omega_0)\right] +$$

$$+ E_{1m}^2 \sigma_{\Delta H}^2 \kappa \left[\frac{1}{\kappa^2 + (\omega - \omega_0)^2} + \frac{1}{\kappa^2 + (\omega + \omega_0)^2}\right]. \qquad (3.17)$$

Графическое изображение энергетического спектра в области положительных частот представлено на рис. 3.3.

Таким образом, спектр поля вторичного излучения при моногармоническом облучающем поле и изменении контактного сопротивления во времени по непрерывному случайному закону с ненулевым средним значением содержит дискретную составляющую на частоте облучения и сплошной спектр, симметрично расположенный относительно частоты облучающего поля.

Спектральный анализ электромагнитного поля вторичного излучения при более строгих предположениях относительно изменения $\dot{H}(j\omega, t)$ связан со значительными математическими трудностями. Интересующемуся читателю можно рекомендовать работу [8], посвященную исследованию мультипликативных помех в радиоканалах. Более строгие, чем приведенные здесь, расчеты показы-

вают, что соотношения мощностей дискретной и непрерывной составляющих спектра поля вторичного излучения будут зависеть от глубины фазовых искажений при облучении переменного контакта, а сплошная часть энергетического спектра может быть несимметричной.

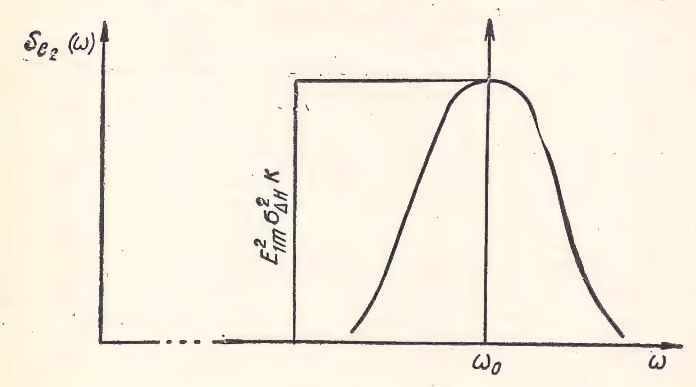


Рис. 3.3. График энергетического спектра $S_{e_2}(\omega)$ при облучении переменных контактов с трением качения или скольжения

3.2.2. Случайно переключающиеся разрывные контакты

Изменение контактного сопротивления у переменных контактов этой группы описывается импульсным случайным процессом. Параметры этой импульсной последовательности, характеризующие геометрическую форму, или положение импульсов (амплитуду, длительность, момент возникновения переднего фронта, скважность и т. д.), в общем случае являются случайными функциями времени.

Общая теория импульсных случайных процессов рассмотрена в работе [10].

Рассмотрим характеристики поля вторичного излучения при следующих ограничениях и допущениях:

— облучающее поле является моногармоническим с частотой ω_0 и со случайно распределенной фазой в интервале от $-\pi$ до $+\pi$;

— передаточная функция $\dot{H}(j\omega, t)$ не зависит от частоты, т. е. происходят чисто амплитудные искажения;

— изменение $H(t)$ описывается апериодическим импульсным случайным процессом, образованным последовательностью прямоугольных импульсов постоянной

длительности τ_0, но со случайными амплитудами импульсов и длительностями пауз;

— вероятностные характеристики импульсов не зависят от их номеров в последовательности, т. е. отсутствует межимпульсная корреляция.

В одной из реализаций импульсного случайного процесса выделим последовательность со счетным количеством импульсов со средним значением периода повторения между соседними импульсами, равным T.

Предположим, что паузы между импульсами распределены по экспоненциальному закону

$$f_{\tau_n}(t) = \frac{1}{T_1} e^{-t/T_1},$$

где $T_1 = T - \tau_0$.

При этих ограничениях энергетический спектр изменения передаточной функции эквивалентного четырехполюсника можно записать в виде [10]

$$S_H(\omega) = \frac{2H_0(\omega)\,\tau_0^2}{T} \,|\, s(\omega)\,\tau_0 \,|^2 \times$$

$$\times \left\{ \frac{\sigma_H^2}{H_0^2(\omega)} + \frac{1}{1 + 2\dfrac{\sin \omega\tau_0}{\omega(T-\tau_0)} + \left[\dfrac{\sin \dfrac{\omega\tau_0}{2}}{\dfrac{1}{2}\,\omega\,(T-\tau_0)}\right]^2} + \frac{\delta(\omega)}{T} \right\}, \quad (3.18)$$

где $H_0(\omega)$, σ_H^2 — соответственно среднее значение и дисперсия коэффициента передачи четырехполюсника на частоте облучающего поля;

$|s(\omega\tau_0)| = \dfrac{\sin \dfrac{\omega\tau_0}{2}}{\dfrac{\omega\tau_0}{2}}$ — спектральная плотность прямоугольного импульса единичной амплитуды с длительностью τ_0.

Пусть значения коэффициента передачи $H(t)$ при замыканиях переменного контакта на время τ_0 из-за нестабильности контактного сопротивления подчиняются двухпараметрическому Γ-распределению:

$$f(H) = \frac{1}{\beta^{\alpha+1}\Gamma(\alpha+1)} H^{\alpha} e^{-H/\beta}. \quad (3.19)$$

Тогда среднее значение H_0 и дисперсия σ_H^2 равны

$$H_0 = (\alpha + 1)\beta, \ \sigma_H^2 = \beta^2(\alpha + 1). \qquad (3.20)$$

С учетом (3.20) формула (3.18) примет вид

$$S_H(\omega) = \frac{8(\alpha+1)^2 \beta^2 \sin^2 \frac{\omega\tau_0}{2}}{T\omega^2} \times$$

$$\times \left\{ \frac{1}{\alpha+1} + \frac{1}{1 + 2\frac{\sin \omega\tau_0}{\omega(T-\tau_0)} + \left[\frac{\sin\frac{\omega\tau_0}{2}}{\frac{1}{2}\omega(T-\tau_0)}\right]^2} + \frac{\delta(\omega)}{T} \right\}. \qquad (3.21)$$

Для случая быстротечных замыканий элементов контактной пары и при достаточно редких переключениях, т. е. при выполнении условия $\tau_0 \ll T_1 = T - \tau_0$, второе слагаемое в выражении (3.21) можно приравнять единице. Тогда

$$S_H(\omega) \approx \frac{8(\alpha+1)^2 \beta^2 \sin^2\frac{\omega\tau_0}{2}}{T\omega^2}\left[\frac{2+\alpha}{\alpha+1} + \frac{\delta(\omega)}{T}\right] =$$

$$= S_h(\omega) + S_\partial(\omega). \qquad (3.22)$$

Из выражения (3.22) следует, что $S_H(\omega)$ содержит дискретную и непрерывную составляющие. Спектр контактных помех определяется только непрерывной составляющей, соответствующая ей моментная функция может быть определена по формуле

$$B_h(\tau) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} S_h(\omega)\, e^{j\omega\tau} d\omega =$$

$$= \frac{(\alpha+1)(\alpha+2)\beta^2\tau_0}{\pi T}(\tau_0 - |\tau|). \qquad (3.23)$$

Окончательно для корреляционной функции электромагнитного поля контактных помех получим

$$B_{e_2}(\tau) = B_{e_1}(\tau)\, B_h(\tau) =$$

$$= \frac{(\alpha+1)(\alpha+2)\beta^2\tau_0 E_m}{2\pi T}(\tau_0 - |\tau|)\cos\omega_0\tau. \qquad (3.24)$$

График $B_{e_2}(\tau)$ приведен на рис. 3.4.

Как следует из формулы (3.24), корреляционная функция контактных помех при введенных допущениях

близка к корреляционной функции одиночного прямоугольного радиоимпульса с длительностью τ_0 и частотой заполнения ω_0.

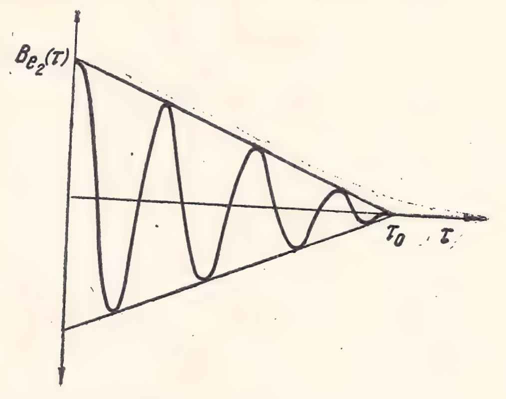


Рис. 3.4. График корреляционной функции $B_{e_2}(\tau)$ при облучении случайно переключающегося переменного контакта

Обратным преобразованием по формуле Винера-Хинчина легко определить соответствующий $B_{e_2}(\tau)$ энергетический спектр. На графике он будет иметь вид спектра одиночного прямоугольного радиоимпульса, симметрично расположенного на частотной оси относительно частоты облучающего электромагнитного поля.

3.3. ОБЛУЧЕНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО КОНТАКТА ПОЛОСОВЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Рассмотренные выше примеры относились к случаям облучения линейных переменных контактов моногармоническим электромагнитным полем излучателя. Характерным для таких полей является наличие в спектральном составе излучения только одной составляющей на частоте ω_0. Это позволяло при анализе спектральных и корреляционных характеристик вторичного электромагнитного поля проводить расчеты по сравнительно простым формулам.

Однако реальный спектр электромагнитного поля излучений передатчиков занимает определенную полосу частот, ширина которой зависит от вида модуляции,

спектра передаваемых сообщений. Стремление к достижению помехоустойчивой радиосвязи привело к разработке принципиально новых широкополосных систем связи.

При анализе спектра вторичного излучения переменного контакта, находящегося в таких электромагнитных полях, необходимо учитывать изменение коэффициента передачи $\dot{H}(j\omega, t)$ не только во времени, но и в зависимости от частоты.

Электромагнитное поле назовем полосовым, если энергия высокочастотных колебаний сосредоточена в ограниченной полосе частот с шириной Δf от $f_н$ до $f_в$ и выполняется условие $\Delta f \ll f_0$, где $f_0 = {}^1/_2(f_н + f_в)$ — средняя частота колебаний.

Для случая линейного переменного контакта в предположении статистической независимости $\dot{H}(j\omega, t)$ от параметров облучающего электромагнитного поля и его стационарности в широком смысле справедливы следующие расчетные соотношения [4, 10]:

$$\left.\begin{aligned} \dot{B}_{e_2}(\tau) &= \frac{1}{4\pi}\int\limits_{-\infty}^{\infty} \dot{B}_H(\tau, \omega)\, \dot{S}_{e_1}(\omega)\, e^{j\omega\tau}\, d\tau; \\ \dot{S}_{e_2}(\omega) &= \frac{1}{2\pi}\int\limits_{-\infty}^{\infty} \dot{S}_{e_1}(\omega)\, \dot{\Gamma}(\omega, \omega')\, d\omega, \end{aligned}\right\} \qquad (3.25)$$

где $\dot{\Gamma}(\omega, \omega') = \int\limits_{-\infty}^{\infty} \dot{B}_H(\tau, \omega')\, e^{j\omega'\tau} e^{-j\omega\tau} d\tau.$

$\dot{\Gamma}(\omega, \omega')$ — спектральная плотность мощности флюктуаций передаточной функции линейного инерционного четырехполюсника для составляющей облучающего электромагнитного поля на частоте ω.

Определим спектр поля вторичного излучения линейного периодического контакта, облучаемого полем передатчика, работающего в режиме ДЧТ (двойной частотной телеграфии).

Представим $\dot{H}(j\omega, t)$ в виде ряда Фурье:

$$\dot{H}(j\omega, t) = \sum_{n \geqslant 0} \dot{H}_n(j\omega) \cos(n\Omega t + \psi_n), \quad \psi_0 = 0. \qquad (3.26)$$

Для простоты анализа примем

$$\dot{H}_n(j\omega) = \dot{H}_0(j\omega)\, e^{-\alpha n\omega},$$

где α — коэффициент ослабления членов ряда Фурье.

Тогда моментную функцию четырехполюсника можно определить по формуле

$$\dot{B}_H(\tau) = \frac{1}{2} \sum_{n \geqslant 1} [H_0(j\omega)\, e^{-\alpha n\omega}]^2 \cos n\Omega t. \qquad (3.27)$$

Энергетический спектр электромагнитного поля излучения передатчика, работающего в режиме ДЧТ, определен в работе [11]. Предполагалось, что по обоим каналам передаются клиппированные радиоимпульсы с постоянными амплитудами E_m, с экспоненциальным распределением длительностей пауз, случайной начальной фазой высокочастотного заполнения, распределенной на интервале $(+\pi, -\pi)$, с равной вероятностью значений частот излучений ω_1, ω_2, ω_3, ω_4.

При этих условиях

$$S_{e_1}(\omega) = E_m^2 T \sum_{i \geqslant 1} \frac{1}{1 - (\omega - \omega_i)^2 T^2}, \quad \omega > 0, \qquad (3.28)$$

где T — период следования радиоимпульсов.

Для положительных значений ω можно определить $\dot{\Gamma}(\omega, \omega')$ в виде

$$\dot{\Gamma}(\omega, \omega') = \pi \sum_{n \geqslant 1} [\dot{H}_0(j\omega)\, e^{-\alpha n\omega'}]^2 [\delta(\omega' - \omega - n\Omega) + \delta(\omega' - \omega + n\Omega)], \quad \omega > 0. \qquad (3.29)$$

Спектр поля вторичного излучения линейного периодического контакта $S_{e_2}(\omega)$ будет равен

$$S_{e_2}(\omega) = R_e \dot{S}_{e_2}(\omega) = E_m^2 H_0(\omega)\, T \sum_{n \geqslant 1} \sum_{i=1}^{4} \left[\frac{e^{-2\alpha n}(\omega_i + n\Omega)}{1 + (\omega - \omega_i + n\Omega)^2 T^2} + \frac{e^{-2\alpha n}(\omega_i - n\Omega)}{1 + (\omega - \omega_i - n\Omega)^2 T^2}\right], \quad \omega > 0. \qquad (3.30)$$

Из формулы (3.30) следует, что энергетический спектр вторичного электромагнитного поля облучаемого периодического контакта представляет сумму спектров облу-

чающего поля, сдвинутых на частотной оси вправо и влево около частот заполнения ω_1—ω_4 на $n\Omega$ и уменьшенных по амплитуде в $[H_0(\omega)\,e^{-\alpha n\omega}]^2$ раз (рис. 3.5).

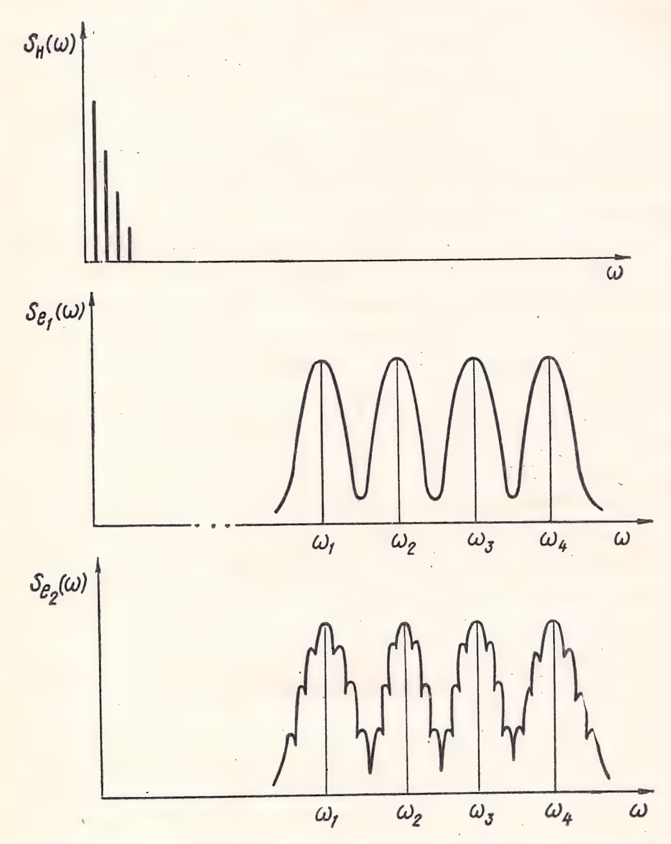


Рис. 3.5. Облучение периодически переключающегося переменного контакта полосовым электромагнитным полем

Характер огибающей спектра контактных помех в случае облучения периодически переключающегося переменного контакта полем передатчика, работающего в режиме ДЧТ, существенно зависит от соотношения между частотой переключения Ω и сдвигом между частотами заполнения $\Delta\omega$.

Можно выделить следующие случаи.

1. $\Delta\omega > 2N\Omega$, где N — максимальный номер составляющей при разложении $\dot{H}(j\omega, t)$ в ряд Фурье. Тогда спектральные составляющие $\omega_i \pm n\Omega$, сгруппированные около частот заполнения ω_i, не пересекаются и огибающая спектра контактных помех будет состоять из непересекающихся огибающих, сдвинутых на частотной оси друг относительно друга на $\Delta\omega$.

2. $\Delta\omega < 2N\Omega$. В этом случае огибающая спектра контактных помех в каждой точке частотной оси находится суммированием всех составляющих и может иметь самую неопределенную форму.

Аналитическое определение спектра вторичного излучения при более общих предположениях относительно законов изменения передаточной функции переменного контакта $\dot{H}(j\omega, t)$ наталкивается на серьезные математические трудности, и не всегда решение может быть доведено до конца.

Определение спектральных характеристик поля вторичного излучения во многих случаях упрощается, если использовать метод, предложенный в работе [15].

Снова рассмотрим случай облучения полосовым электромагнитным полем линейного переменного контакта с передаточной функцией $\dot{H}(j\omega, t)$ (рис. 3.6, *а*). Для анализа поля вторичного излучения существенно поведение $\dot{H}(j\omega, t)$ в пределах полосы частот облучающего поля, т. е. от ω_1 до ω_2.

Заменим $\dot{H}(j\omega, t)$ четырехполюсником с передаточной функцией $\dot{H}^*(j\omega, t)$ (рис. 3.6, *б*).

$$\dot{H}^*(j\omega, t) = \begin{cases} \dot{H}(j\omega, t) & \text{при } \omega_1 \leqslant \omega \leqslant \omega_2, \\ 0 & \text{при } \omega > \omega_2,\ \omega < \omega_1. \end{cases}$$

$\dot{H}^*(j\omega, t)$ можно представить в виде ряда Фурье как функцию частоты с периодом $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$

$$\dot{H}^*(j\omega, t) = \sum_{n \geqslant 1} H_n(t)\, e^{jn \frac{2\pi}{\Delta\omega} \omega}. \qquad (3.31)$$

По определению моментная функция передаточной функции равна

$$\dot{B}_H(\tau) = m_1 \{\dot{H}^*(j\omega, t),\ \dot{H}^*(j\omega, t+\tau)\}.$$

Подставив сюда значения $\dot{H}^*(j\omega, t)$ из формулы (3.31) и учитывая линейность операции разложения в ряд Фурье, получим

$$\dot{B}_H(\tau) = \sum_{n \geqslant 1} \dot{B}_n(\tau)\, e^{jn \frac{2\pi}{\Delta\omega} \omega}, \qquad (3.32)$$

где $\dot{B}_n(\tau) = m_1 \{H_n(t),\ H_n(t+\tau)\}$.

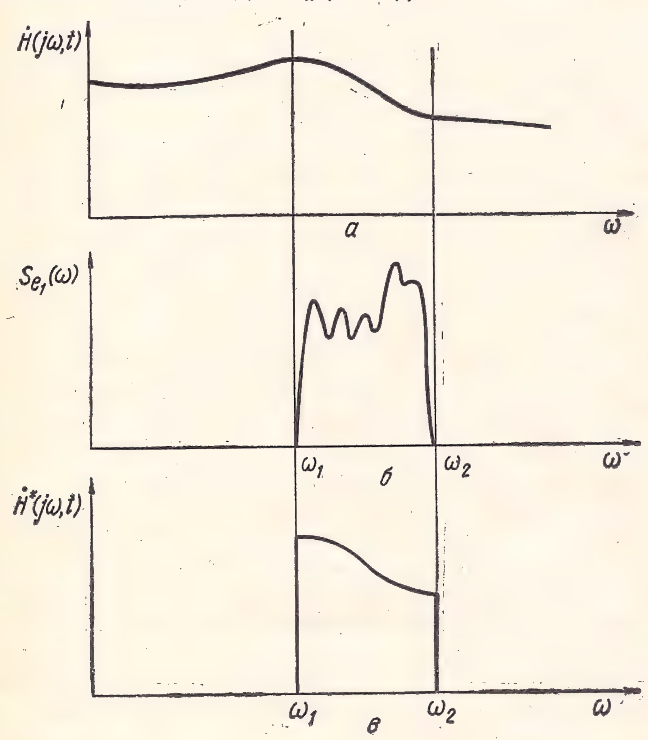


Рис. 3.6. К пояснению замены четырехполюсника с передаточной функцией $\dot{H}(j\omega, t)$ на четырехполюсник с передаточной функцией $\dot{H}^*(j\omega, t)$

Таким образом, задача определения характеристик поля вторичного излучения линейного переменного контакта, облучаемого полосовым электромагнитным полем, сводится к уже рассмотренным случаям прохождения сигналов через параметрические системы с коэффициентом передачи, не зависящим от частоты.

3.4. НЕЛИНЕЙНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ОБЛУЧАЕМОГО ПЕРЕМЕННОГО КОНТАКТА

В достаточно мощных электромагнитных полях, когда напряжение на контактном стыке превосходит напряжение В-фриттинга окисной пленки, процессы в облучаемых переменных контактах приобретают существенно нелинейный характер.

В главе 2 были рассмотрены дуговые процессы в облучаемых переменных контактах, ниже анализируется спектр электромагнитного поля вторичного излучения в случае работы переменного контакта в нелинейном режиме без дугообразования. Этот режим работы возникает в случаях, когда не выполняется одно из двух условий дугообразования (2.11).

Реально такой режим работы облучаемого переменного контакта возникает за счет применения специальных мер против дугообразования. В частности, в качестве примера можно отметить наиболее распространенный метод борьбы с дугообразованием и контактными помехами, заключающийся в шунтировании переменного контакта. Величина наведенного тока проводимости, протекающего через контактный промежуток в зашунтированном переменном контакте, недостаточна для возникновения электрической дуги, хотя наводимое напряжение превосходит $U_{\min}$.

Аналитическое определение спектральных и корреляционных характеристик контактных помех при работе переменного контакта в нелинейном режиме неизмеримо сложнее аналогичной задачи при линейной модели переменного контакта. Нелинейные стохастические дифференциальные уравнения, описывающие работу переменного контакта в этом режиме, не имеют конструктивных методов решения.

Из широкого круга вопросов прохождения сигналов через нелинейные параметрические системы рассмотрим лишь спектральные характеристики электромагнитного поля вторичного излучения, так как они определяют частотное распределение контактных радиопомех в подвижных узлах связи.

С известным приближением работу контакта в нелинейном режиме можно рассмотреть как прохождение сигнала, соответствующего напряженности облучающего электромагнитного поля, через последовательное соеди-

нение нелинейного безынерционного и линейного инерционного параметрического четырехполюсников (рис. 3.7) с передаточными функциями $H(E_1)$ и $\dot{H}(j\omega, t)$.

Таким образом, преобразование спектра электромагнитного поля, происходящее в действительности за счет прохождения наведенного тока проводимости через не-

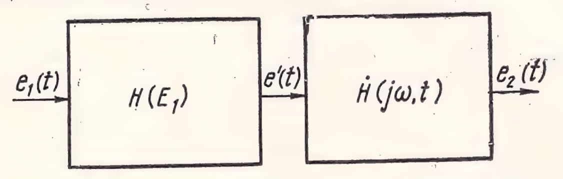


Рис. 3.7. Представление облучаемого переменного контакта, работающего в нелинейном режиме, в виде последовательного соединения двух четырехполюсников

линейное параметрическое комплексное сопротивление на стыке двух соприкасающихся элементов конструкции подвижного объекта, заменяется эквивалентным суммарным эффектом двух преобразований, из которых одно является нелинейным безынерционным, постоянным во времени, а второе — линейным, инерционным и переменным.

Такая эквивалентная замена позволяет провести спектральный анализ контактных помех путем сочетания методов расчета нелинейных безынерционных и линейных инерционных параметрических систем, для которых существуют законченные, хотя и весьма громоздкие, решения.

В качестве примера рассмотрим спектр электромагнитного поля вторичного излучения при следующих предположениях:

— облучающее поле является моногармоническим с частотой ω_0:

$$e_1(t) = E_{1m} \cos \omega_0 t;$$

— переключение нелинейного переменного контакта, а следовательно, и изменение передаточной функции $\dot{H}(j\omega, t)$ описываются периодической функцией времени, разлагаемой в ряд Фурье по компонентам с основной частотой Ω:

$$\dot{H}(j\omega, t) = \sum_{\kappa=1}^{K} \dot{H}_\kappa(j\omega) \cos(\kappa\Omega + \psi_\kappa). \qquad (3.33)$$

Предположим, что характеристика нелинейности передаточной функции $H(E_1)$ с достаточной точностью аппроксимируется полиномом, содержащим члены всех степеней от 1 до N:

$$H(E) = \sum_{n=1}^{N} q_n E_1^n,$$

где q_n — коэффициент аппроксимации.

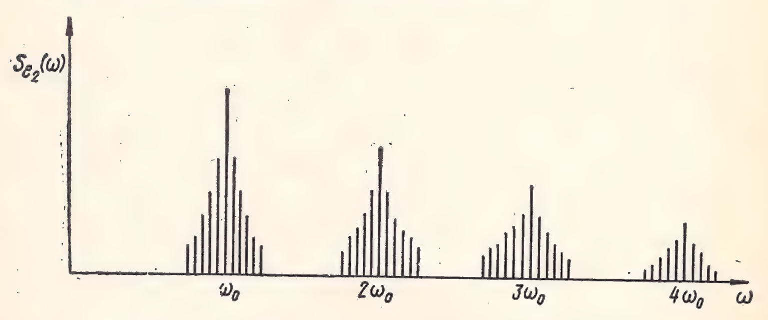


Рис. 3.8. Спектрограмма контактных помех при облучении нелинейного переменного контакта

Известными методами анализа нелинейных электрических цепей [3] находим, что на выходе нелинейного четырехполюсника сигнал $e'(t)$ кроме составляющей на основной частоте входного сигнала ω_0 будет содержать составляющие и на ее гармониках $2\omega_0$, $3\omega_0$ ... до $N\omega_0$ включительно (рис. 3.8).

Запишем $e'(t)$ в виде ряда Фурье

$$e'(t) = \sum_{n=1}^{N} A_n \cos(n\omega_0 t + \varphi_n), \qquad (3.34)$$

где A_n — амплитуда n-й гармоники;

φ_n — фаза n-й гармоники.

Тогда напряженность поля вторичного излучения можно определить по формуле

$$e_2(t) = E_1 Re\{\dot{H}(j\omega, t)\} =$$

$$= \sum_{n=1}^{N} A_n \cos(n\omega_0 t + \varphi_n) \sum_{\kappa=1}^{K} H_\kappa(\omega) \cos(\kappa\Omega t + \psi_\kappa). \qquad (3.35)$$

После несложных, но громоздких вычислений с использованием формул кратных дуг находим

$$e_2(t) = \sum_{\kappa=1}^{K} \sum_{n=1}^{N} \frac{A_n H_\kappa(n\omega_0)}{2} \{\cos[(n\omega_0 + \kappa\Omega)t + \varphi_n + \psi_\kappa] + \\ + \cos[(n\omega_0 - \kappa\Omega)t + \varphi_n - \psi_n]\}. \quad (3.36)$$

Из полученного выражения следует, что электромагнитное поле вторичного излучения нелинейного периодического контакта содержит спектральные составляющие на частотах $\omega_i = n\omega_0 \pm \kappa\Omega$. Спектрограмма выходного сигнала представлена на рис. 3.8. При облучении мощным электромагнитным полем контактные помехи возникают не только около основной частоты облучающего поля, но также и около ее гармоник.

Нелинейное проявление характера контактного сопротивления приводит к резкому увеличению спектра частот, пораженных контактными помехами. Особенно это относится к случаю облучения переменного контакта полигармоническим электромагнитным полем при одновременной работе на излучение сразу нескольких передатчиков.

В полигармоническом электромагнитном поле вследствие нелинейности переменных контактов возникают пораженные для радиоприема участки спектра не только около основных и гармонических излучений, но и около комбинационных частот. Формула для определения комбинационных частот имеет вид

$$f_\kappa = \kappa f_1 + m f_2 + n f_3 + \ldots, \kappa, m, n \ldots = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \ldots,$$

где f_1, f_2, f_3 — частоты излучения передатчиков ПУС.

Уровень спектральных составляющих и ширина ими занимаемой полосы частот зависят от многих факторов, среди которых можно выделить:

— мощности передатчиков, излучения которых участвуют в образовании данной комбинационной частоты;

— характеристики нелинейности и частоты переключения переменного контакта;

— порядок комбинационной частоты p.

$$p = |\kappa| + |m| + |n| + \ldots$$

Из теории нелинейных цепей следует, что максимальный порядок комбинационной частоты, на которой соз-

даются помехи радиоприему, определяется максимальной степенью полинома, аппроксимирующего нелинейность среды (в данном случае контактного сопротивления) [3]. Это означает, что всегда выполняется условие $p \leqslant N$ не-

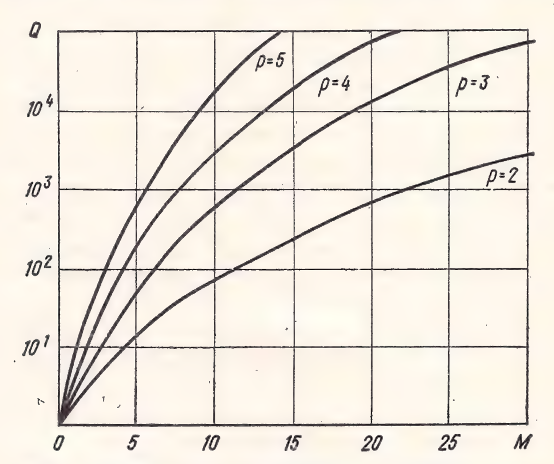


Рис. 3.9. Изменение количества комбинационных частот различных порядков Q в зависимости от числа источников облучающих электромагнитных полей M

зависимо от числа источников облучающих электромагнитных полей.

Количество пораженных контактными помехами комбинационных частот резко возрастает при увеличении числа источников облучающих электромагнитных полей. Рост количества пораженных частот в зависимости от числа излучателей наглядно виден из рис. 3.9. Из-за дискретности значений p и N графики должны иметь ступенчатый характер, но в целях наглядности рисунка они проведены сплошными линиями.

3.5. МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРА КОНТАКТНЫХ ПОМЕХ

Одним из экспериментальных методов исследования спектральных характеристик контактных помех может быть назван метод физического моделирования процессов возникновения контактных помех. Воспроизведение спектра контактных помех в лабораторных условиях позволяет оценить справедливость используемого матема-

тического аппарата, изучить влияние различных факторов, понять процессы возникновения этого специфического вида помех.

Кроме того, метод моделирования позволит наметить мероприятия по борьбе с контактными помехами, оценить эффективность применения уже известных спосо-

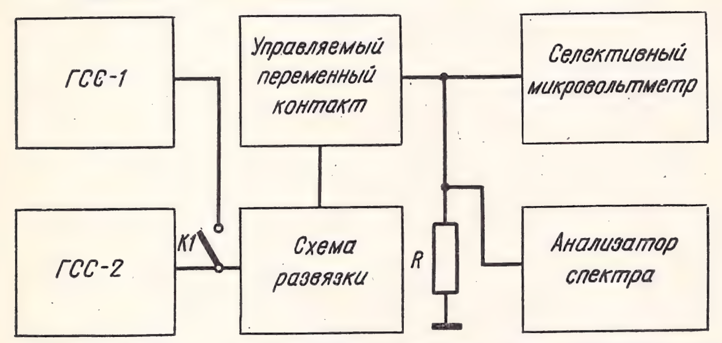


Рис. 3.10. Схема лабораторной установки для моделирования процесса возникновения контактных помех

бов их подавления. Проведение исследований еще на этапе разработки конкретных образцов подвижных узлов связи позволит выиграть время и потребует при этом меньших экономических затрат.

Структурная схема простейшей лабораторной установки, имитирующей процесс возникновения контактных помех, показана на рис. 3.10.

Напряжение, наводимое на элементах облучаемого переменного контакта, воспроизводится с помощью высокочастотного генератора сигналов (ГСС). Сигналы с ГСС проходят через контакты реле с управляемой частотой переключения. В качестве управляемых контактов могут быть использованы обычные схемы мультивибраторов с электромеханическим реле в цепи коллектора транзисторов (рис. 3.11).

Спектральная структура тока в цепи с переменным контактом определяется с помощью анализаторов спектра, подключенных параллельно активному сопротивлению. Уровень возникающих контактных помех измеряется селективным микровольтметром.

Установка позволяет также воспроизвести процессы облучения переменного контакта полигармоническим электромагнитным полем путем подключения дополни-

тельных ГСС. Проявление нелинейного эффекта в облучаемых переменных контактах обнаруживается по факту возникновения контактных помех на комбинационных частотах вида $f_1 \pm f_2$, где f_1, f_2 — частоты сигналов с ГСС.

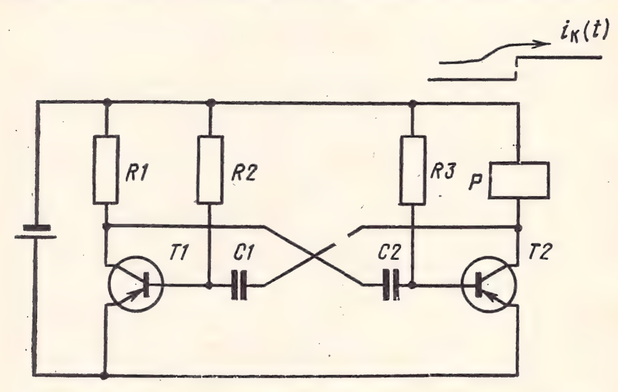


Рис. 3.11. Принципиальная схема управляемого переменного контакта

Определение спектральных характеристик контактных помех и воздействия различных факторов на их распределение может производиться по специальной методике измерений непосредственно на подвижном объекте во время его стоянки [16].

Управляемые контакты подключаются к местам существования переменных контактных сопротивлений, возникающих в процессе движения подвижного объекта. Частоты переключения управляемых контактов выбираются, исходя из диапазона изменения частоты контактирования элементов конструкции подвижных объектов. Практически установлено, что для имитации процесса образования контактных помех достаточно иметь набор управляемых контактов с частотами переключения от 1 Гц до 1 кГц.

Фиксация уровней контактных помех, возникающих при работе радиопередатчиков подвижного объекта, осуществляется с помощью измерительного приемника, подключаемого к штатной антенне. Визуально спектр контактных помех просматривается на экране анализатора спектра или панорамного приемника.

Одновременное подключение нескольких управляемых контактов с различными частотами переключений,

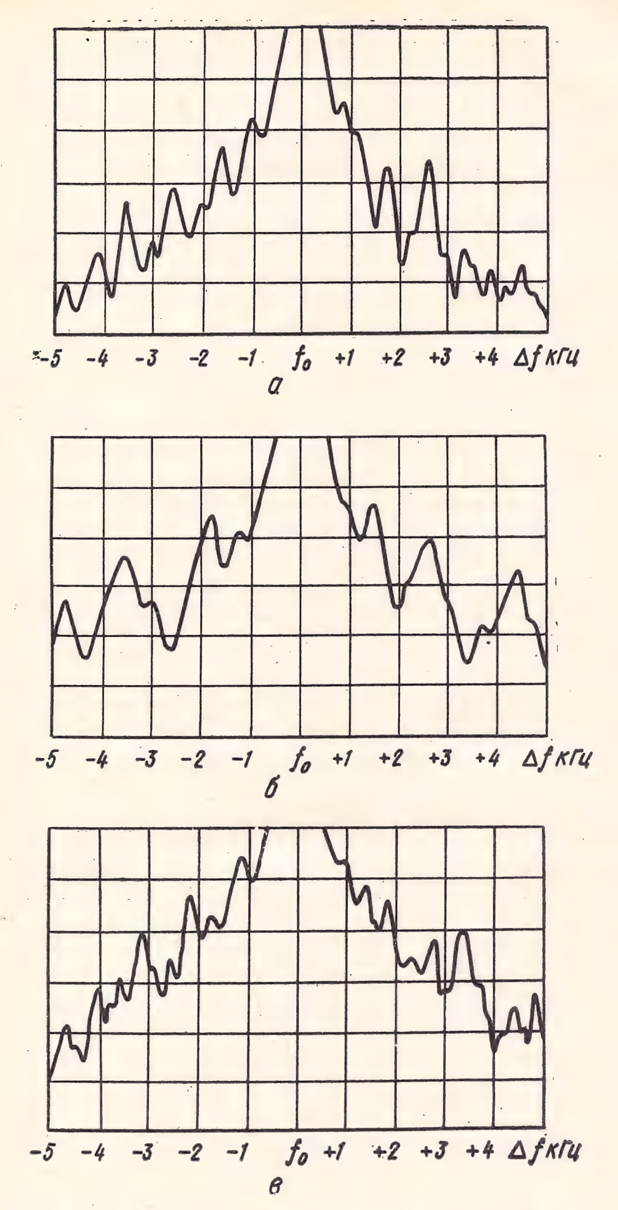


Рис. 3.12. Спектрограммы контактных помех от управляемых переменных контактов на экране панорамного анализатора спектра

длительностями замыканий и размыканий позволяет достаточно хорошо воспроизводить картину контактирования элементов конструкции подвижного объекта во время его движения. Уже при 5—6 управляемых контактах суммарный поток переключений приближается к потоку Пуассона.

На рис. 3.12 представлены спектрограммы контактных радиопомех, возникающих при облучении управляемых контактов, переключающихся по периодическому закону с различными частотами: $\Omega_{ук1}=500$ Гц (*а*), $\Omega_{ук2}=1$ кГц (*б*). Из спектрограмм видно, что полоса частот, занятых контактными помехами, расширяется с увеличением частоты переключений. При одновременной работе двух управляемых контактов происходит наложение спектральных составляющих и суммарный спектр контактных помех сглаживается (*в*).

Подключением управляемых контактов к различным местам возможного существования непостоянного контакта между элементами конструкции подвижного объекта можно выявить наиболее интенсивные источники контактных помех, проверить эффективность предлагаемых конструктивных решений по устранению помех.

Измерениями по данной методике достигается «чистота» эксперимента в условиях реального подвижного объекта, так как при этом удается выделить все спектральные составляющие контактных помех, что практически невозможно осуществить при анализе спектра суперпозиции помех самого различного происхождения. Кроме того, обеспечивается стационарность исследуемого процесса в течение продолжительного времени, потребного для получения аппаратурного спектра контактных помех.

Глава 4

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНТАКТНЫХ ПОМЕХ

4.1. ИНТЕГРАЛЬНЫЙ УРОВЕНЬ КОНТАКТНЫХ ПОМЕХ

Суммарное электромагнитное поле контактных помех, воздействующее на радиоприем в условиях подвижных объектов, представляет результат наложения большого числа вторичных излучений переменных контактов.

На частотах излучения радиопередающих средств подвижного узла связи контактные пары оказываются в той или иной мере электрически развязанными от основной массы корпуса подвижного объекта. Причем степень развязки их повышается с увеличением частоты облучающего электромагнитного поля из-за того, что на высоких частотах внутреннее сопротивление элементов контактных пар приобретает индуктивный характер.

Из элементов конструкции подвижного объекта формируется множество элементарных излучателей типа рамки или диполя. Амплитудные и фазовые соотношения между излучениями зависят как от индивидуальных характеристик изменения контактного сопротивления у порождающих их переменных контактов, так и от условий распространения по пути к радиоприемным устройствам подвижного объекта.

Пределы изменения составляющих $R_к$, $L_к$, $C_к$ контактного сопротивления в элементарных излучателях контактных помех определяются массой, жесткостью крепления соприкасающихся элементов конструкций, скоростью движения подвижного объекта и многими другими причинами. Число одновременно образующихся переменных контактов из элементов конструкции, их распределение по подвижному объекту в конкретные моменты вре-

мени случайны. Вследствие этого случайным становится и суммарный уровень контактных радиопомех на входе радиоприемных устройств.

Как было показано в главе 3, напряженность электромагнитного поля вторичного излучения любого переменного контакта, работающего в линейном режиме, можно представить в виде суммы искаженной и неискаженной составляющих. Это обстоятельство позволяет записать выражение для мгновенного значения напряженности поля вторичного излучения в форме

$$e_2(t) = E_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + \sum_{m=1}^{M} e_m \cos(\omega_0 t + \theta_m), \quad (4.1)$$

где $E_0 = \sqrt{\sum_{m=1}^{M} e_{0m}^2}$ — суммарная амплитуда неискаженной составляющей напряженности поля;

φ_0 — постоянная во времени фаза напряженности на частоте облучающего поля ω_0;

M — количество элементарных излучателей контактных помех;

e_m, θ_m — случайные амплитуда и фаза искаженной составляющей.

Выражение (4.1) можно преобразовать

$$e_2(t) = E(t) \cos[\omega_0 t + \theta(t)],$$

где огибающая $E(t)$ и фаза $\theta(t)$ связаны между собой соотношениями, вытекающими из условий определения аналитического сигнала по Гильберту [1].

Обозначим через

$$\overline{e^2} = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} e_2^2(t)\, dt$$

среднюю за период T мощность электрического поля контактных помех одиночного переменного контакта.

В случае равенства средних мощностей излучения $\overline{e^2}$ всех переменных контактов, образующих электромагнитное поле контактных помех радиоприему, плотность ве-

роятности огибающей $\omega(E)$ будет распределена по обобщенному закону Релея [17]:

$$w(E) = \frac{E}{\sigma_E^2} \exp\left(-\frac{E^2 - E_0^2}{\sigma_E^2}\right) I_0\left(\frac{EE_0}{\sigma_E^2}\right),$$

где $\sigma_E^2 = N \frac{\overline{e^2}}{2}$ — средняя мощность искаженной части напряженности поля вторичного излучения;

I_0 — модифицированная функция Бесселя 1-го рода нулевого порядка.

При этом полагается также статистическая независимость переключения переменных контактов.

Однако реальная картина распределения контактных помех не может быть описана этими идеализированными условиями.

Прежде всего мощности электромагнитных полей вторичного излучения переменных контактов подвижных объектов меняются в широких пределах, так как амплитудные и временные параметры изменения контактных сопротивлений переменных контактов, порождающих их, существенно различны. Кроме того, электромагнитные излучения переменных контактов испытывают различные ослабления при распространении к антенне приемного устройства.

В условиях подвижных объектов не всегда выполняется также требование о некоррелированности изменений контактных сопротивлений во времени. Вибрация, тряска, качка могут одновременно действовать на все подвижные части конструкции.

Мгновенное значение огибающей $E(t)$ напряженности суммарного поля контактных помех будет содержать как флюктуационную, так и импульсную компоненты. Наличие флюктуационной компоненты обусловлено воздействием контактных помех от переменных контактов с трением качения и скольжения. Контактные помехи импульсного характера образуются при облучении случайно переключающихся разрывных контактов.

Визуальный анализ осциллограмм и прослушивание контактных помех подтверждают квазиимпульсный характер распределения суммарного уровня контактных помех. Согласно [14] квазиимпульсные случайные процессы характеризуются следующими свойствами.

1. Помехи представляют собой нерегулярную последовательность импульсов (ни один из параметров, характеризующих амплитудное, частотное и временное распределение, не является строго постоянным).

2. Количество импульсов в единицу времени недостаточно для того, чтобы суммарную помеху на входе приемника можно было трактовать как флюктуационную помеху, и слишком большое, чтобы рассматривать как отдельные импульсы.

3. Во входных избирательных контурах приемника происходит наложение переходных процессов, вызванных последовательными импульсами потока.

Флюктуационная компонента может быть выражена через среднее значение напряженности поля контактных помех $\overline{E}_0$, а импульсная — по изменению амплитуды огибающей мгновенного значения напряженности поля помех в виде дополняющей функции распределения, т. е. вероятности превышения амплитудой огибающей уровня:

$$W(E) = P\left[E(t) > \overline{E}_0\right].$$

При увеличении числа и частоты контактирующихся элементов суммарное поле контактных помех приближается к нормальному случайному процессу.

Как показывают результаты экспериментальных измерений, соотношения между флюктуационной и импульсной компонентами суммарного уровня контактных помех зависят от преобладающего типа изменения переходного сопротивления в переменных контактах подвижного объекта, режима его движения, частоты измерения.

Так, например, флюктуационная компонента преобладает в общем уровне контактных помех в вертолетах, а импульсная — в условиях железнодорожного транспорта. Обе компоненты имеют место в суммарном поле контактных помех в самолетных, автомобильных узлах связи.

Доля флюктуационной компоненты в общем уровне контактных помех возрастает с приближением частоты измерений к частотам основных, побочных и интермодуляционных излучений передатчиков подвижного объекта.

Суммарное электромагнитное поле контактных помех может быть представлено в виде узкополосного случайного процесса. Условием этого является выполнение не-

равенства $\overline{\Omega} \ll \omega_0$, где $\overline{\Omega}$ — средняя частота переключений переменных контактов подвижного объекта

Энергетические спектры совокупности контактных помех от множества переменных контактов подвижного объекта сгруппированы около частот основных, побочных и интермодуляционных излучений передатчиков.

4.2. ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ КОНТАКТНЫХ ПОМЕХ

Знание помеховой обстановки является необходимым условием для организации эффективного функционирования радиосредств подвижного объекта. Наибольшая полнота и достоверность данных об уровнях и спектральном составе помех радиоприему могут быть достигнуты лишь проведением измерений в натурных условиях и на фоне действующей радиосвязи. Измерения необходимы также для определения наиболее интенсивных источников контактных помех, путей их воздействия на приемные устройства.

Однако при проведении измерений контактных помех на подвижных объектах нужно учитывать ряд специфических особенностей, которые могут повлиять на точность и достоверность получаемых экспериментальных данных. Эти особенности обусловлены спецификой функционирования радиосредств подвижных объектов.

Измерения помех приходится проводить в ближней зоне электромагнитного поля передатчиков подвижного объекта. Для этой зоны характерна резкая неоднородность структуры электромагнитного поля, его двойственная волновая и индуктивная природа. В ближней зоне нет определенного соотношения между магнитной и электрической составляющими поля, поэтому измерения, проводимые даже со стандартными измерительными антеннами электрического (штыревые) и магнитного (рамочные) типов, будут значительно отличаться по показателям приборов.

Высокая интенсивность электромагнитного поля в ближней зоне снижает достоверность проводимых измерений, так как применение многих высокочувствительных и точных приборов ограничено. Из-за недостаточной экранировки кожухов приборов мощные сигналы передатчиков могут привести к появлению нелинейных продуктов преобразования в измерительной аппаратуре. Досто-

верность снижается также из-за воздействия на результаты измерений посторонних сигналов на частотах побочных каналов приема измерительных приборов.

Порядок проведения измерений помех регламентируется требованиями Государственной комиссии по радиочастотам (ГКРЧ) и общесоюзными нормами [5]. В условиях подвижных объектов некоторые из регламентируемых требований по проведению измерений трудновыполнимы. Например, не всегда возможно обеспечить требуемое пространственное разнесение измерительной аппаратуры от посторонних мешающих предметов, полностью устранить вибрацию и тряску во время проведения измерений на ходу, избавиться от мешающего влияния металлической массы корпусов подвижного объекта и от непостоянства сопротивления заземления измерительных приборов в движении.

Экспериментальное исследование контактных помех связано с проведением измерений в широкой полосе частот, определяемой частотным диапазоном работы радиосредств подвижного объекта, и в большом динамическом интервале изменения уровней помех. Это возможно лишь при использовании нескольких измерительных приборов, различающихся по своим характеристикам. Возникает необходимость пересчета результатов измерений для достижения однозначности экспериментальных данных.

Известно, что напряжение помех на входе измерительного приемника (в предположении его линейным звеном) прямо пропорционально ширине полосы пропускания. Пересчет показаний измерительных приборов с разными полосами пропускания можно провести согласно формуле

$$\Delta U = 20к \lg \sqrt{\frac{\Delta f_{шир}}{\Delta f_{узк}}},$$

где ΔU — разница между измеренными напряжениями помех в дБ;
$к$ — коэффициент пропорциональности;
$\Delta f_{шир}$, $\Delta f_{узк}$ — ширина полосы пропускания измерительных приемников.

При использовании измерительного прибора с более широкой полосой уровень помех увеличивается на ΔU дБ по сравнению с результатом измерений с узкой полосой,

и наоборот. Значения $к=1,2\div1,6$ берутся для приборов с полосой пропускания 3 кГц и $к=0,7\div1,0$ — для приборов с полосой пропускания 1,2 кГц.

Уровень контактных помех может быть описан в виде напряженности электромагнитного поля или напряжения на входе радиоприемных и измерительных средств.

Измерение напряженности поля производится специальными измерителями помех, снабженными комплектами стандартных антенн. Согласно требованиям ГКРЧ поле помех до 20 МГц измеряется на однометровую штыревую антенну, свыше 20 МГц используется полуволновой диполь. Расстояние между источником помех и измерителем должно быть всегда более 1 м.

При проведении измерений напряженности электромагнитного поля контактных помех необходимо иметь в виду, что контактные пары из элементов корпуса подвижного объекта создают вторичные электромагнитные поля различной структуры. Это определяется конфигурацией контактной пары, поэтому следует раздельно определять напряженности электрической и магнитной составляющей полей контактных помех.

Кроме того, стандартные измерительные антенны реагируют лишь на вертикальную составляющую электромагнитного поля, в то время как на антенны приемных радиосредств воздействуют излучения с различной поляризацией. При измерении напряженности помех антенны должны поворачиваться как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях для определения максимального значения показаний.

Современные измерители помех обеспечивают определение квазипикового, эффективного и среднего значений напряжений помех. Это обеспечивается подключением к выходу усилителя промежуточной частоты измерителей помех соответственно квазипикового, квадратичного детекторов и детектора среднего значения. Нормирование же индустриальных помех производится по квазипиковым значениям напряжений помех.

Оценим точность измерения напряжения контактных помех квазипиковым измерителем.

Каждый импульс контактных помех возбуждает во входном контуре измерителя последовательность радиоимпульсов. В предположении прямоугольности характеристики избирательности усилителя измерителя помех,

напряжение на входе квазипикового детектора может быть записано в виде

$$U(t) = \kappa_у \frac{E\Delta f}{\pi f_0} \frac{\sin(\pi\Delta f t)}{\pi\Delta f t} \sin\omega_0 t = U'(t)\sin\omega_0 t,$$

где $\kappa_у$ — коэффициент усиления до детектора;
E — единичный скачок импульса контактной помехи на входе измерителя;
$\omega_0 = 2\pi f_0$ — круговая частота;
$U'(t)$ — огибающая процесса.

Система «квазипиковый детектор — RC-фильтр на его выходе» может быть представлена линейным инерционным звеном с импульсной реакцией $h(\tau)$. Тогда напряжение на выходе фильтра $U(t)$ может быть найдено по интегральной свертке:

$$U(t) = \int_0^T h(\tau) U''(T-\tau)\,d\tau,$$

где $U''(T-\tau)$ — напряжение на входе RC-фильтра, равное произведению огибающей $U'(t)$ на коэффициент детектирования $\kappa_д$.

Импульсная реакция RC-фильтра имеет вид [4]

$$h(\tau) = \alpha e^{-\alpha\tau}, \text{ где } \alpha = \frac{1}{RC}.$$

Среднее значение напряжения на выходе квазипикового детектора за время измерения T равно

$$\overline{U(T)} = \kappa_д \overline{U'(T)} \left(1 - e^{-\alpha T}\right). \qquad (4.2)$$

Из выражения (4.2) следует, что отсчитываемое по шкале измерителя помех напряжение контактных помех $\overline{U(T)}$ зависит от времени анализа. Относительная ошибка за счет конечности времени анализа равна

$$\gamma = \frac{\overline{U(T)} - \overline{U'(T)}}{\overline{U(T)}} = 1 - \kappa_д\left(1 - e^{-\alpha T}\right).$$

Необходимо дополнительно иметь в виду, что $\kappa_д$ квазипикового детектора зависит от частоты следования и длительности импульсов помех [14].

Результаты измерений напряженности поля и напряжения помех зависят также от характеристик измерительных приборов: постоянной времени заряда и разряда квазипикового детектора, баллистической постоян-

ной времени индикатора, величины затуханий по побочным каналам приема и эффективности экранирования кожухом прибора.

В 1969 г. на измерители радиопомех был введен ГОСТ 11001—69, согласно которому были нормированы значения указанных выше характеристик в соответствии с международными соглашениями.

Находящиеся еще в настоящее время в эксплуатации измерители радиопомех ИП-12-2М, ИП-13М, ИП-18, ИП-21, ИП-25, ИП-26, П4-6, П4-4А, П4-5А, П4-7А не соответствуют требованиям стандарта. Для измерения напряженности поля помех предназначены измерительные приемники П5-1, П5-2 с комплектами калибровочных антенн П6-1, П6-28.

Требованиям МККР и ГОСТ 11001—69 соответствуют измерители напряженности поля и радиопомех I класса производства ГДР типов FSM-6, FSM-7, FSM-8, приборы II класса BSM-301 и BSM-401. Из отечественных приборов для грубой ориентировочной оценки уровня и поиска источников контактных помех в диапазоне частот 0,15—300 МГц рекомендуются измерители радиопомех II класса П4-12А, П4-13А. Измерение напряжения в полосе частот 0,15—30,0 МГц можно проводить также селективным микровольтметром В6-1.

При измерениях контактных помех в натурных условиях трудно обеспечить «чистоту» эксперимента. На достоверность получаемых результатов влияет присутствие других видов помех. Суммарный уровень помех образуется наложением помех от многих источников, и определение доли контактных помех в общем уровне помех требует проведения каждый раз как минимум двух измерений: при наличии и отсутствии причины их возникновения.

По результатам двух таких измерений уровень контактных помех определяется по формуле

$$U_{\text{к. п}} = \sqrt{U_1^2 - U_2^2},$$

где U_1 — напряжение (напряженность поля) помех при наличии контактных помех;

U_2 — напряжение (напряженность поля) помех при отсутствии причин возникновения контактных помех.

Для обеспечения достоверности результатов уровни остальных видов помех при этих измерениях должны оставаться постоянными. Это возможно лишь в случае, когда промежутки времени между измерениями незначительны и уровни посторонних помех не успевают за это время измениться. В условиях подвижных объектов наиболее удобно проводить такие измерения при включении и выключении передатчиков, создающих облучающее электромагнитное поле.

Вопрос о выборе измерения только напряженности поля или только напряжения контактных помех также не имеет однозначного решения. Разработчиков подвижных узлов связи контактные помехи интересуют с точки зрения оценки их мешающего воздействия на радиосвязь. Проникновение контактных помех на входы радиоприемных устройств может происходить как через приемную антенну, так и по цепям питания, управления, заземления и коммутации. Поэтому между напряжением, измеренным на входе приемника, и напряженностью поля контактных помех в месте расположения приемной антенны нет однозначного соответствия. Для наиболее полной характеристики помеховой обстановки на подвижных объектах рекомендуется проводить оба вида измерений контактных помех.

Действующее значение напряжения (напряженности поля) контактных помех за некоторый интервал времени представляет случайный процесс, поэтому результаты единичных измерений также являются случайными величинами и могут служить лишь оценками. Получение несмещенных состоятельных оценок обеспечивается лишь при проведении достаточно большого количества измерений за квазистационарный период изменения случайного процесса помех.

Характеристики контактных помех в условиях подвижных объектов зависят от многих факторов. При проведении измерений следует принимать во внимание скорость и режим движения, время суток, техническое состояние транспортной базы, состояние дороги, вид тяги и другие факторы.

Результаты конкретных измерений уровней контактных помех $U_{к.п}$ можно представить в виде значения многопараметрической функции

$$U_{к.п}=f\{X\},$$

где $\{X\}$ — множество факторов, определяющих помеховую обстановку на подвижных объектах.

Задачей измерений является установление зависимостей между уровнем контактных помех и значениями факторов $x_1, x_2, x_3, ..., x_к \notin \{X\}$. Простейшей схемой проведения экспериментов считаются однофакторные испытания.

Суть их заключается в следующем. Измерениям предшествует первоначальный этап выяснения факторов из множества $\{X\}$. Совокупность этих факторов образует факторное пространство размерностью K.

Выбирается какой-либо фактор $x_j \notin \{X\}$. В ходе измерений замеряются уровни контактных помех при вариации фактора x_i во всем интервале его ожидаемых значений. При этом остальные факторы остаются неизменными. Семейство зависимостей $U_{к.\,п} = f(x_i)$ получается той же процедурой измерения, но при этом какой-то фактор $x_j \neq x_i$ из множества ранее неизменяемых факторов принимает ряд последовательных значений. Естественно, ввиду того что результаты единичных наблюдений представляют случайные величины, речь может идти только об установлении зависимостей средних значений уровней помех от определяющих факторов.

Схема однофакторных испытаний — наиболее простой, но в то же время наиболее трудоемкий способ проведения измерений. В настоящее время известны более рациональные способы экспериментального исследования многофакторных процессов, разрабатываемые в рамках теории планирования экспериментов. В основе этих методов лежит идея достижения максимально возможной информации об исследуемом процессе при каждом единичном измерении.

Изучение помеховой обстановки необходимо рассматривать как составную часть в общей системе мероприятий по обеспечению электромагнитной совместимости радиосредств подвижного объекта. Частотное регламентирование работы установленных радиосредств базируется на знании частотного распределения контактных помех.

Частотное распределение контактных помех наиболее удобно исследовать визуальными методами с помощью панорамных приемников и анализаторов спектра. В настоящее время промышленностью выпускаются анализаторы спектра С4-25, С4-16, обеспечивающие просмотр частот от 0,02 до 270 МГц.

Однако при разработке подвижных узлов связи важно определить полосы частот, в пределах которых нельзя назначать частоты для работы приемных радиосредств из-за высокого уровня контактных помех. Определение «полос забития» ΔF_i контактными помехами производится по условию превышения интегральным уровнем помех некоторой заранее установленной величины $U_{доп}$. Значение $U_{доп}$ выбирается из условия обеспечения требуемого качества радиосвязи и соответствует предельно допустимому уровню помех на входе радиоприемников подвижного узла связи, когда еще обеспечивается необходимое отношение сигнал — помеха. Из-за недостаточной точности анализаторов спектра использование их для определения «полос забития» не всегда возможно.

Для анализа частотного распределения контактных помех приходится использовать стандартные измерители напряжения помех. Измерения проводятся на многих частотах, расположенных достаточно плотно в пределах «полос забития», так как с помощью серийно-выпускаемых измерителей помех исследуется только узкий участок частотного спектра. «Полосы забития» контактными помехами около частот основных излучений передатчиков подвижного объекта достигают 2—3 МГц и более в зависимости от их мощности.

Эти измерения трудоемкие и связаны с большой потерей времени, из-за чего снижается также достоверность получаемых результатов. За время измерений условия, определяющие уровни контактных и прочих видов помех, могут существенно измениться.

Выходом из этого положения является разработка средств оперативного измерения помех на многих частотах в автоматическом режиме и выдачи результатов в виде, удобном для последующей статистической обработки. В настоящее время в промышленности разрабатывается подобная аппаратура, позволяющая оценивать помеховую обстановку в широком интервале частот. В качестве измерителя помех в такой аппаратуре может быть использован радиоприемник, идентичный устанавливаемым на подвижных объектах, работающий с аналогичной приемной антенной и сопряженный со средствами автоматической обработки и регистрации результатов измерений.

Многофакторность процесса распределения контактных помех обусловливает необходимость применения при

их исследовании электронно-вычислительной техники, пример использования которой для решения конкретной задачи приводится ниже.

4.3. МЕТОД СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ХАРАКТЕРИСТИК РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНТАКТНЫХ ПОМЕХ

Исследования многопараметрических случайных процессов, к которым можно отнести контактные помехи, связаны с проведением огромного числа обработок в целях набора представительных выборок при вариации каждого из влияющих факторов. Оперативное и точное определение числовых характеристик законов распределения возможно лишь при автоматизации процессов анализа случайных процессов с использованием средств вычислительной техники.

Для определения закона и характеристик распределения огибающей суммарного уровня контактных помех была разработана специальная методика статистического анализа с использованием электронно-вычислительной машины, работающей в реальном масштабе времени в режиме прерывания программ.

Пусть огибающая напряжения контактных помех описывается случайной функцией $U(t)$. Частная реализация распределения помех показана на осциллограмме (рис. 4.1).

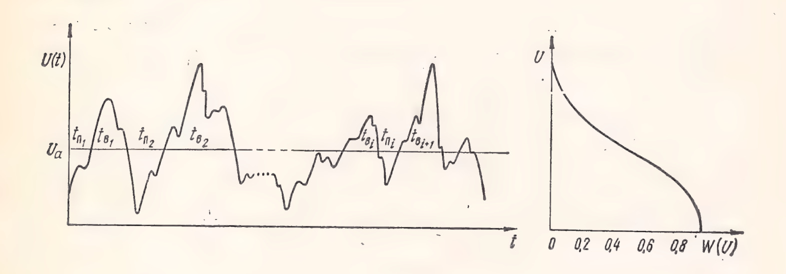


Рис. 4.1. Осциллограмма контактных помех

Относительной длительностью помехи $\tau_{U_а}$ на уровне анализа $U_а$ будем называть

$$\tau_{U_а} = \frac{\sum_{i \geqslant 1}^{n} t_{в_i}}{T} = \frac{T_в}{T},$$

где n — количество случаев превышения («выбросов») помехой уровня $U_а$;

$t_{в_i}$ — время длительности «выбросов»;

$T_в$ — суммарное время превышения помехой уровня анализа $U_а$;

T — время обработки помехи.

При условии стационарности процесса $U(t)$ с увеличением интервала обработки T величина $\tau_{U_а}$ будет стремиться к вероятности наличия контактных помех с уровнем выше $U_а$.

$$\lim_{T \to \infty} \tau_{U_а} = P[U(t) \geqslant U_а] = W(U_а),$$

где $W(U_а)$ — функция распределения огибающей напряжения контактных помех.

Увеличив уровень анализа на величину $\Delta U_а$, можно таким же образом вычислить значение $W(U_а + \Delta U_а)$. Таким образом, закон распределения амплитуды огибающей $W(U_а)$ может быть определен в результате последовательного статистического анализа распределений длительностей «выбросов» помехи на разных уровнях ограничения. При этом уровни анализа должны охватывать весь интервал уровней ожидаемых контактных помех.

Структурная схема метода, реализующего изложенный принцип определения закона распределения уровня контактных помех, представлена на рис. 4.2.

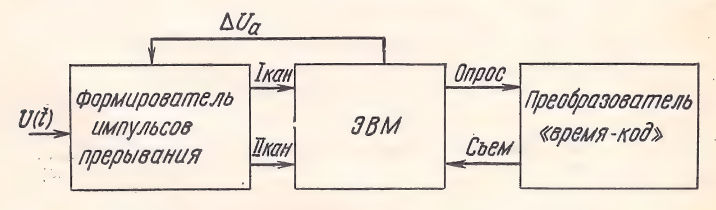


Рис. 4.2. Структурная схема метода статистического анализа контактных помех

Случайный процесс $U(t)$, описывающий изменение уровня напряжения контактных помех, поступает на формирователь импульсов прерывания (ФИП), представляющий собой специальную схему многоуровневого амплитудного селектора с двумя каналами выдачи импульсов прерывания программы (ИПП) на электронно-вычислительную машину (ЭВМ).

Критерием выдачи ИПП по первому каналу является выполнение условий:

$$U(t) \leqslant U_a;$$
$$U(t + \Delta t) > U_a;$$

по второму каналу

$$U(t) \geqslant U_a;$$
$$U(t + \Delta t) < U_a,$$

где U_a — установленный на ограничителе уровень анализа;

Δt — малый отрезок времени.

По импульсам прерывания ЭВМ осуществляет управление работой преобразователя «время — код» (съем информации в ячейки памяти вычислительной машины, сброс преобразователя на «нуль» после каждого съема информации), а также первичную обработку информации о временном распределении «выбросов» случайного процесса $U(t)$ за установленный уровень анализа U_a и пауз между «выбросами» по специальной «аварийной» программе работы.

По достижении заданного времени обработки контактных помех $T_{a.зад}$ производится окончательная обработка массива значений длительностей «выбросов» и пауз между ними на установленном уровне ограничения и результаты расчета выдаются на цифровую печать. Переход к обработке контактных помех на следующем уровне ограничения происходит автоматически после окончания процесса обработки на предыдущем уровне анализа.

Практическая реализация данного метода была осуществлена с использованием ЭВМ «Днепр-1». Устройство обеспечивает определение и выдачу на цифровую печать следующих статистических характеристик распределения контактных помех:

— математического ожидания и дисперсии длительностей «выбросов» и пауз между ними на уровнях анализа;

— суммарного и относительного времени пребывания случайного процесса $U(t)$ выше и ниже уровней анализа;

— гистограмм распределения длительностей «выбросов» и пауз.

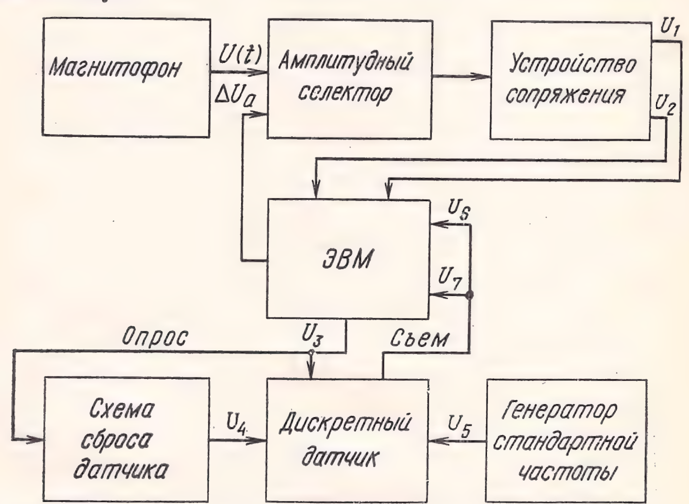


Рис. 4.3. Функциональная схема установки для статистического анализа контактных помех

Эти характеристики обеспечивали последующее графическое определение одномерного интегрального закона распределения огибающей, пикфактора и скважности контактных помех.

Функциональная схема установки приведена на рис. 4.3. Установка состоит из источника случайного процесса, многоуровневого амплитудного селектора, устройства сопряжения, генератора стандартной частоты, дискретного датчика и схемы сброса датчика на «нуль».

В качестве источника случайного процесса $U(t)$ использовался магнитофон. Контактные помехи предварительно записывались на магнитофонную ленту. Запись осуществлялась с выхода специального измерительного приемника. Для идентичности условий исследования запись помех и последующее их воспроизведение при обработке на ЭВМ осуществлялись при фиксированных положениях ручек регулировок и работе каскадов усилителей приемника и магнитофона на линейном участке

характеристики. Привязка уровней ограничения амплитудного селектора к уровням контактных помех на входе измерительного приемника проводилась по калибровоч-

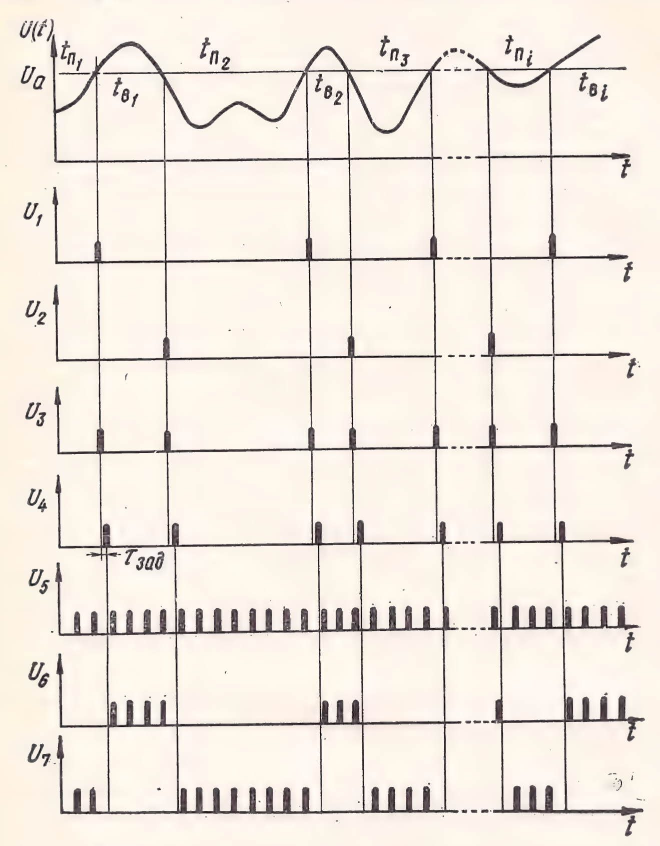


Рис. 4.4. Временные диаграммы, поясняющие работу установки

ному графику. График составлен на основе обработки записей сигналов известной частоты и амплитуды, подаваемых со специального генератора на вход измерительного приемника.

На рис. 4.4 представлены временные диаграммы, поясняющие работу всей установки.

Случайный уровень контактных помех с магнитофона поступает на амплитудный селектор, который «срезает»

его по установленному уровню анализа $U_а$. Устройство сопряжения выдает ИПП в ЭВМ в моменты перехода случайного уровня помехи через уровень ограничения по двум каналам: при переходе снизу вверх $\left(\frac{dU}{dt}>0\right)$ — по первому каналу, сверху вниз $\left(\frac{dU}{dt}<0\right)$ — по второму каналу. С генератора стандартной частоты стабилизированные импульсы с постоянной амплитудой и длительностью поступают на дискретный датчик, собранный по схеме двоичного счетчика.

При приходе ИПП по любому из двух каналов ЭВМ начинает работать в режиме прерывания программ. В устройстве управления ЭВМ вырабатывается импульс для съема информации с дискретного датчика. Информация в двоичном коде о длительностях «выбросов» случайного процесса помех за установленный уровень ограничения (при приходе ИПП по второму каналу) либо пауз между «выбросами» (при приходе ИПП по первому каналу) с триггеров дискретного датчика записывается в ячейки памяти ЭВМ.

Спустя время $\tau_{зад}$, значительно меньшее интервала следования импульсов с генератора стандартной частоты, с помощью схемы сброса датчика, представляющей схему задержки с усилителем, производится формирование из импульса съема информации импульса сброса, обнуляющего дискретный датчик.

Параллельно с этим в ЭВМ по «аварийной» программе происходит первичная обработка информации. К моменту прихода очередного ИПП по другому каналу ЭВМ должна завершить выполнение «аварийной» программы по предыдущему импульсу прерывания. Одновременная работа ЭВМ сразу по двум ИПП невозможна.

Блок-схема алгоритма программной реализации метода приведена на рис. 4.5.

Исходным положением при работе в режиме прерывания выбран «останов», т. е. ЭВМ, которая, отработав короткую «аварийную» программу по приходу одного ИПП, ждет прихода следующего ИПП. «Аварийная» программа состоит из минимально необходимого числа команд, так как возможность метода по регистрации минимальных длительностей пауз или «выбросов» определяется временем отработки вычислительной машиной по одному импульсу прерывания.

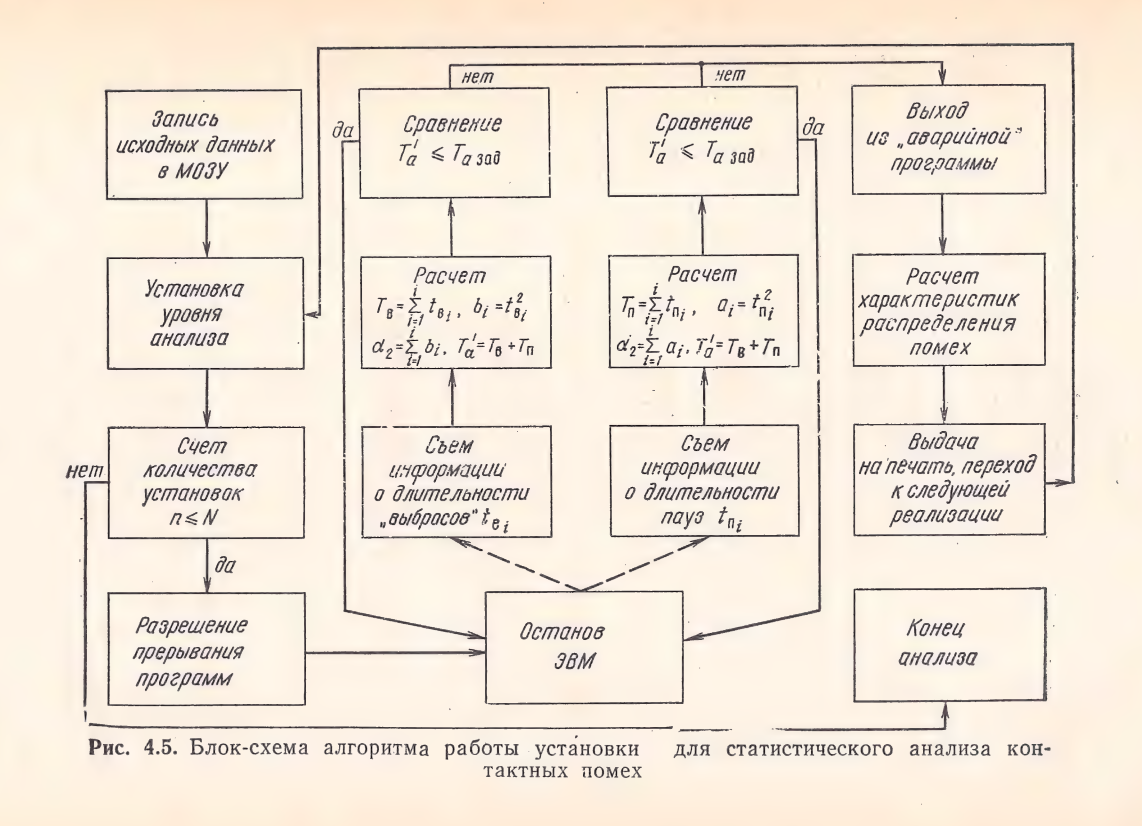


Рис. 4.5. Блок-схема алгоритма работы установки для статистического анализа контактных помех

Критерием выхода ЭВМ из работы в режиме прерывания программ может служить заранее заданное время анализа случайного процесса $T_{а.зад}$, как на рис. 4.5, или количество прерываний, определяемое из имеющегося числа ячеек памяти для хранения массивов значений длительностей «выбросов» и пауз между ними.

Выход из «аварийной» программы осуществляется засылкой в регистр разрешения прерываний ЭВМ импульсов запрещения прерываний.

Математическая обработка значений $t_{вi}$ и $t_{пi}$, записанных в ячейки памяти, производится по известным формулам математической статистики, обеспечивающим получение состоятельных и несмещенных оценок искомых параметров распределений.

При определении лишь двух параметров (математического ожидания и дисперсии) распределения значений $t_{пi}$ и $t_{вi}$ можно обойтись без выделения огромного числа ячеек памяти для хранения массива их значений, если дисперсия будет определяться через второй начальный момент:

$$Д = (\alpha_2 - m_1^2)\frac{n}{n-1},$$

где α_2 — второй начальный момент,

$$\alpha_2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} t_i^2}{n};$$

m_1 — математическое ожидание,

$$m_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n} t_i}{n};$$

n — число прерываний программы.

По окончании процесса анализа помех на одном уровне ограничения ЭВМ автоматически переходит к анализу на следующем уровне. Величина шага анализа $\Delta U_а$ задается (подбирается) в зависимости от диапазона изменения уровня контактных помех и необходимой точности определения интегральной функции распределения огибающей.

К числу достоинств данного метода следует отнести соответствие результатов статистического анализа реальным значениям контактных помех, воздействующих на радиосвязь с подвижных объектов. Достигается это тем, что запись контактных помех осуществляется в натурных условиях с выходов приемников, идентичных используемым для радиосвязи и работающих на штатную приемную антенну.

4.4. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНТАКТНЫХ ПОМЕХ И ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ИХ УРОВЕНЬ

Приведенные ниже статистические характеристики контактных помех получены в ходе массовых измерений при работе передающих и приемных радиосредств, установленных в вагонах железнодорожного состава. Однако основные закономерности по распределению контактных радиопомех и влиянию различных факторов справедливы для всех видов подвижных узлов связи.

Результаты измерений и последующая статистическая обработка на ЭВМ подтверждают квазиимпульсный характер распределения суммарного уровня контактных помех с наличием некоторой постоянной составляющей и импульсных выбросов. При установившейся скорости движения математическое ожидание и дисперсия длительности импульсов помех на уровнях анализа изменяются незначительно, а случайный процесс, описывающий распределение уровня контактных радиопомех с допустимой погрешностью, может рассматриваться как стационарный. Интервалы локальной стационарности при движении по неэлектрифицированным участкам железной дороги достигают 30 мин.

Плотность вероятности суммарного уровня контактных помех может быть описана с помощью логарифмически-нормального распределения. Параметры функции распределения определяются условиями проведения измерений контактных помех.

Исследование влияния различных факторов на уровень контактных радиопомех проводилось как путем постановки специальных экспериментов, так и путем измерений в реальных условиях действующей радиосвязи. Объем полученных экспериментальных материалов до-

статочен для получения достоверных оценок по воздействию каждого фактора.

Оценка ширины «полосы забития» контактными помехами ΔF_i около частот облучающих излучений проводилась по уровню 15 дБ относительно 1 мкВ на входе радиоприемника. Выбор этого значения обусловлен наличием других видов помех, которые при меньшем уровне существенно искажали бы результаты экспериментов.

Влияние мощности излучения передатчиков подвижного объекта на уровень контактных помех иллюстрируется графиками на рис. 4.6. Кривые получены при пространственном разносе между передатчиком и приемником, равном 125 м, и работе их на рамочные антенны магнитного типа. Ширина полосы пропускания приемника равнялась 1,1 кГц. Из рис. 4.6 видно, что при работе на подвижном объекте нескольких радиопередатчиков уровень контактных помех в основном определяется работой наиболее мощного передатчика.

Вектор электрической напряженности поля передатчика в месте нахождения переменного контакта можно выразить в виде

$$\overline{E} = E_m e^{j\omega_0 t} e^{-j(\kappa r + \psi)},$$

где E_m — амплитуда электрической напряженности облучающего поля в точке контактирования;
ω_0 — круговая частота облучающего излучения;
κ — волновой коэффициент; $\kappa = \frac{2\pi}{\lambda}$;
r — расстояние от передатчика до контакта;
ϕ — фаза.

Результирующий электрический вектор при работе M передатчиков на частоте ω_0 определяется по закону сложения векторов. Его величина зависит от соотношения амплитуд, разности фаз и углов прихода. Поэтому при одновременной работе нескольких передатчиков на одной и той же частоте уровень возникающих контактных помех меньше, чем при работе одного передатчика с мощностью, равной сумме их мощностей.

Зависимость уровней контактных помех от частотной расстройки между частотами излучения и измерения хорошо аппроксимируется выражением

$$U_{\text{к. п}} = \frac{a}{\sqrt[3]{\Delta f^4}},$$

где $U_{к. п}$ — уровень контактных помех в дБ на входе приемника относительно 1 мкВ;
a — коэффициент аппроксимации;
Δf — разность частот между частотами излучения передатчика и настройки приемника в МГц.

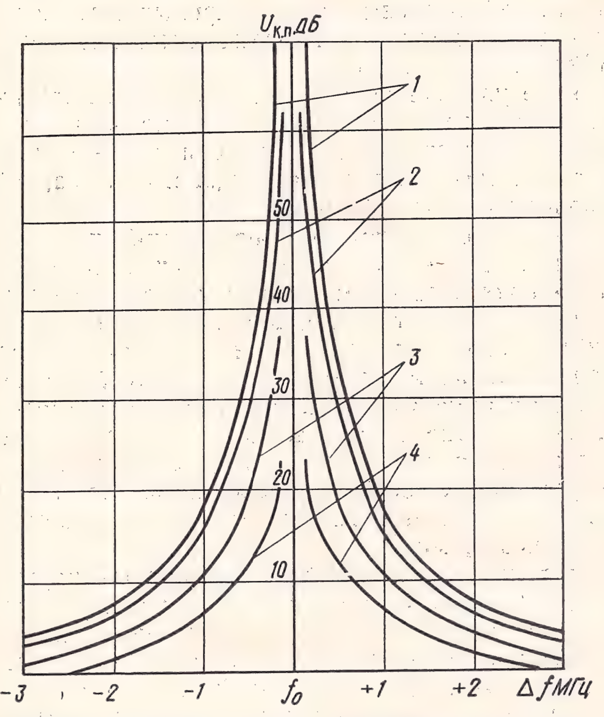


Рис. 4.6. Изменение уровня контактных помех в зависимости от частоты, количества и мощности передатчиков:

1 — совместная работа трех передатчиков с мощностями излучения 1, 3 и 5 кВт; *2* — работа одного передатчика мощностью 5 кВт; *3* — работа одного передатчика мощностью 3 кВт; *4* — работа одного передатчика мощностью 1 кВт

Значение коэффициента a определяется экспериментально для каждого подвижного объекта с учетом пространственного разноса передатчиков и приемников, мощности излучения передатчиков и ширины полосы приема приемников. Для условий проведения эксперимента, представленного на рис. 4.6, коэффициенты аппрокси-

мации составляют: $a=17$ для кривой *1*, $a=15$ для кривой *2*, $a=11$ для кривой *3* и $a=7$ для кривой *4*.

Аналогичный характер убывания уровней контактных помех с увеличением величины частотной отстройки наблюдается и около гармонических и интермодуляционных излучений. Максимумы этих кривых убывают с ростом номеров гармоник и порядка интермодуляционных и комбинационных частот.

Влияние увеличения мощности облучающего излучения передатчиков сказывается не только на возрастании уровня контактных радиопомех, но и на резком расширении с некоторого значения мощности суммарной ширины полосы частот забития.

Причина этого состоит в проявлении нелинейности облучаемых переменных контактов. Так, если работа переменных контактов в линейном режиме сопровождается возникновением контактных помех лишь около основного и гармонических излучений передатчиков, то при работе в нелинейном режиме полосы частот, пораженных контактными помехами, появляются и около комбинационных частот. Экспериментально установлено, что при мощностях излучения передатчиков выше 1 кВт резко усложняется поиск доступных рабочих частот для приемников из-за расширения спектра частот, поражаемых контактными помехами.

Естественно, что некоторые контактные пары работают в нелинейном режиме и при малых мощностях излучения. Это прежде всего переменные контакты вблизи передающей антенны. Однако ввиду их удаленности от приемной антенны и сравнительной малочисленности мешающее влияние этих контактов на радиоприем сказывается незначительно. При больших же мощностях в нелинейный режим работы переходит значительное число переменных контактов, в том числе и расположенные вблизи приемной антенны.

Уровень контактных помех с удалением от передающей антенны уменьшается. На рис. 4.7 показано распределение уровня контактных помех по вагонам железнодорожного состава. Графики получены при работе передатчика в первом вагоне на частоте 10,140 МГц с излучаемой мощностью 3 кВт. Измерения проводились с помощью стандартного измерителя помех со штыревой антенной на частоте 11 МГц. Скорость движения составляла 60 км/ч.

Кривые хорошо согласуются с характером распределения электрической напряженности поля в ближней зоне. Уровни контактных помех при удалениях от передающей антенны менее $\lambda/2\pi$ убывают обратно пропорционально кубу, в промежутке от $\lambda/2\pi$ до $2\pi\lambda$ — обратно

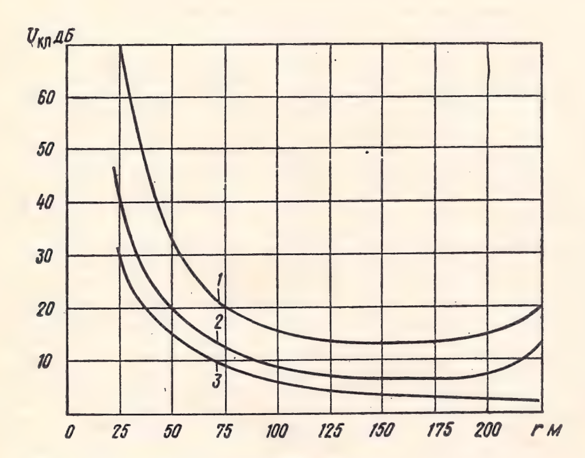


Рис. 4.7. Распределение уровня контактных помех по вагонам железнодорожного состава в зависимости от вида тяги и железной дороги:

1 — электровоз; *2* — тепловоз под контактной сетью; *3* — тепловоз на неэлектрифицированной железной дороге

пропорционально квадрату расстояния до источника облучающего электромагнитного поля. Возрастание уровней контактных помех в последнем вагоне при движении под контактной сетью железной дороги можно объяснить отражением от неоднородности, если систему «контактный провод — железнодорожный состав — рельсы» рассматривать как длинную линию.

Контактная сеть, металлическая масса корпусов вагонов железнодорожного состава способствуют переносу контактных помех к приемным антеннам. Доказательством этого является то, что угол прихода контактных помех совпадает с осью железнодорожного состава.

Экспериментальное подтверждение этого предположения получено измерениями контактных помех на направленную рамочную антенну компаратора, установленного

на вращающейся платформе на крыше вагона. На криволинейных участках железной дороги направление прихода максимального уровня контактных помех всегда совпадает с осью приемного вагона, а не с направлением на передающую антенну.

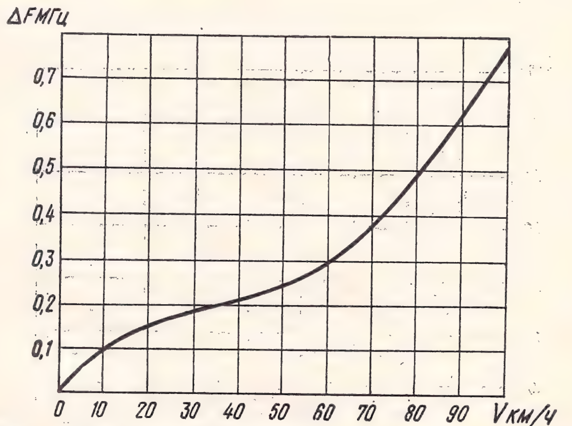


Рис. 4.8. Влияние скорости движения подвижного объекта на ширину полосы частот, пораженных контактными помехами

Ширина «полосы забития» контактными помехами несколько уменьшается с возрастанием частоты облучающего электромагнитного поля передатчика. Это явление хорошо согласуется с теоретическими положениями главы 2. На высоких частотах эквивалентное контактное сопротивление переменных контактов подвижного объекта определяется в основном емкостной составляющей, величина сопротивления которой с увеличением частоты уменьшается Уменьшение величины изменения сопротивления переменного контакта вызывает уменьшение искаженной составляющей в составе электромагнитного поля вторичного излучения.

Уровень и частотное распределение контактных помех во многом зависят от условий и режима движения подвижного объекта. Результаты измерений по оценке влияния скорости движения на ширину полосы частот, пораженных контактными помехами около основной частоты излучения передатчика, приведены на рис. 4.8.

Из рис. 4.8 следует, что при увеличении скорости движения до 60 км/ч уровень контактных помех возрастает

незначительно. При дальнейшем повышении скорости наблюдается резкое расширение ширины «полосы забития» контактными помехами.

Предполагается, что резкое увеличение уровня контактных помех при высоких скоростях движения подвижных объектов вызывается проявлением одной или всей совокупности следующих причин:

1. На высоких скоростях увеличивается сопротивление заземления корпуса автомашин и железнодорожных вагонов. Так, например, в условиях железнодорожного транспорта микрошероховатости на поверхности железнодорожных рельсов и колес не успевают продавливаться, эффективная площадь контактирования уменьшается. Вследствие этого увеличивается потенциал, наводимый на корпусе подвижного объекта, и контактирование элементов конструкции происходит при больших напряжениях.

2. Увеличивается число переменных контактов. В относительное движение приходят части конструкции, между которыми при малых скоростях существует устойчивый контакт.

3. Повышается частота контактирования элементов конструкции, что вызывает расширение спектра контактных помех.

В условиях речных и морских судов аналогичные явления могут возникать за счет качки.

Измерениями установлено, что торможение, резкие повороты и набор скорости сопровождаются увеличением уровня контактных помех. При трогании с места уровень контактных помех возрастает за счет появления в их составе составляющих с незначительными амплитудами. При торможении, проезде подвижных объектов по мостам с металлическими фермами структура контактных помех резко изменяется: происходит увеличение амплитуд и уменьшение длительности импульсных выбросов, сокращение пауз между ними. На железнодорожных объектах уровень контактных помех возрастает также при проходе встречных поездов, при проезде мимо опор подвески контактной сети.

Визуальный анализ энергетического спектра контактных помех свидетельствует о неравномерности спектральной плотности помех в пределах «полосы забития» (рис. 4.9). Наличие дискретных составляющих в спектре

контактных помех может быть объяснено периодичностью в процессе соприкосновения отдельных контактных пар в процессе движения подвижного объекта.

При движении корпус любого подвижного объекта испытывает горизонтальные и вертикальные колебания.

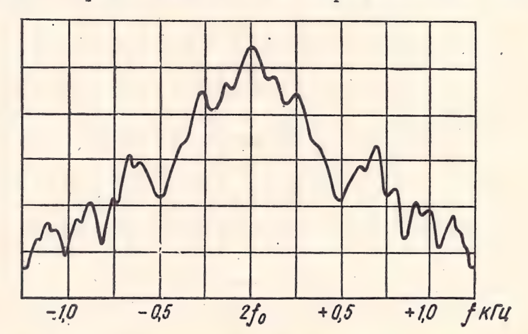


Рис. 4.9. Спектрограмма контактных помех при движении подвижного объекта

Вероятность возникновения этих колебаний определяется как воздействием внешних факторов (вибрация, тряска, качка), так и резонансными свойствами механических связей в конструкции корпуса и его элементах.

БОРЬБА С КОНТАКТНЫМИ ПОМЕХАМИ И ЭМС РЭС ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

5.1. СПОСОБЫ УСТРАНЕНИЯ ИЛИ ОСЛАБЛЕНИЯ КОНТАКТНЫХ ПОМЕХ В МЕСТАХ ИХ ВОЗНИКНОВЕНИЯ

Как было показано выше, в условиях современного транспорта принципиально нельзя полностью избавиться от переменных контактов, возникающих при движении подвижных объектов, а следовательно, и от контактных помех.

Борьба с контактными помехами в местах их возникновения может вестись по следующим основным направлениям:

— устранение переменных контактов и причин их возникновения;

— уменьшение величин наведенного тока, протекающего через переменное контактное сопротивление, и напряжения, прикладываемого к контактному промежутку;

— экранирование источников контактных помех.

Уменьшение числа переменных контактов в подвижном объекте может осуществляться разными способами. Наиболее простым и надежным способом обеспечения постоянства сопротивления между деталями и элементами корпусов подвижных объектов являются сварка и пайка. Этот способ может быть применим во всех случаях, когда по конструктивным соображениям допускаются подобные соединения элементов подвижного объекта. Наиболее характерными примерами таких соединений можно назвать обеспечение электрического контакта между шинами заземлений с кузовом автомашины, корпусом корабля, фюзеляжем самолета, т. е. везде, где требуется неразъемное и жесткое соединение элементов.

Если сборкой контактирующихся деталей достигается устранение причины возникновения контактных помех путем механического и электрического соединения элементов контактной пары, то при использовании метода изоляции контактирующихся деталей, наоборот, переходное сопротивление в местах касания увеличивается до бесконечной величины. Метод приводит к полному прекращению протекания постоянного тока через переменное контактное сопротивление.

Для устранения взаимного касания металлических элементов между ними устанавливают изоляционные прокладки, в качестве которых могут быть использованы различные диэлектрики. Основным требованием к изоляционным прокладкам являются их механическая прочность и хорошие диэлектрические свойства в используемом диапазоне радиочастот.

Для изоляции деталей, между которыми в процессе движения подвижного объекта не возникает больших механических усилий, можно рекомендовать резиновые и капроновые прокладки, втулки. Широкое применение получают прокладки из текстолита, пластмасс, синтетических смол, обладающих неплохими диэлектрическими параметрами. Качественная изоляция на высоких частотах обеспечивается при использовании фторопласта, радиофарфора.

При установке изоляционных прокладок сохраняется подвижность и свобода перемещений контактирующихся элементов, но электрическая связь между ними сводится до минимальной величины. Известно, что установка диэлектрика между проводящими поверхностями приводит к образованию конденсатора, сопротивление которого высокочастотному току будет определяться его емкостью. Таким образом, при взаимном перемещении элементов контактной пары, изолированных прокладкой, реактивное сопротивление между ними будет все же непостоянным и вместо амплитудно-фазовой модуляции облучающего электромагнитного поля, как это было в случае неизолированного переменного контакта, будет происходить одна паразитная фазовая модуляция. Глубина модуляции будет весьма незначительной, так как диапазон изменения емкостной составляющей контактного сопротивления небольшой, особенно в случаях применения достаточно толстых изоляционных прокладок.

Полное устранение переменного контакта осуществляется заменой металлических элементов контактных пар на диэлектрические, если это возможно по условиям эксплуатации подвижных объектов. Так, например, в условиях железнодорожного транспорта устранение чрезвычайно интенсивного источника контактных помех — металлических тормозных колодок достигается изготовлением их из синтетических материалов на основе каучука и фенолформальдегидной смолы. Металлические сетки ограждения на судах заменяют на капроновые.

Другим направлением борьбы с контактными помехами является уменьшение величины наведенного высокочастотного тока, протекающего через переменное контактное сопротивление. Это может быть достигнуто несколькими способами.

Наиболее простым считается максимально возможное удаление передающих и приемных антенн от переменных контактов. При этом уменьшается величина электродвижущей силы, наводимой на контактирующихся элементах электромагнитным полем передатчика, и происходит ослабление контактных помех на пути их распространения к приемной антенне. Этот способ целесообразно учитывать при проектировании подвижных узлов связи. Но практика показывает весьма ограниченную возможность использования этого способа. Это в первую очередь касается малогабаритных подвижных объектов (автомашин, самолетов), а также подвижных узлов связи с большим количеством всевозможных радиоэлектронных средств (железнодорожные и корабельные узлы связи).

Возможность резкого изменения наведенного тока проводимости, протекающего через переменный контакт, в значительной степени уменьшается при уменьшении величины переходного сопротивления между контактирующимися элементами подвижного объекта. Это достигается параллельным соединением переменного контактного сопротивления и высокопроводящего шунта.

Метод шунтирования сводится к обеспечению надежного электрического соединения между соприкасающимися металлическими деталями. Само по себе соединение деталей может быть осуществлено различными способами, выбор которых зависит от особенностей конструкции, условий работы и эксплуатации подвижных объектов.

Шунтирование осуществляется с помощью гибких металлических перемычек, контактных пружин и других устройств. Шунты, имея малое внутреннее сопротивление, закорачивают переменное контактное сопротивление

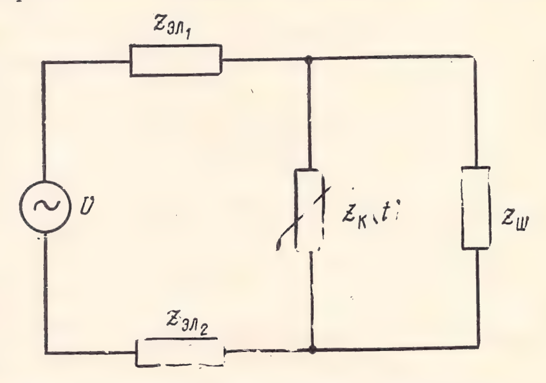


Рис. 5.1. Эквивалентная схема зашунтированного переменного контакта, облучаемого электромагнитным полем

и устраняют тем самым возможность резких бросков тока, протекающего по цепи.

Эквивалентную схему зашунтированного облучаемого переменного контакта можно представить в виде, изображенном на рис. 5.1.

При шунтировании значительная часть наведенного тока проводимости протекает через короткозамыкающую перемычку и лишь малая часть его — непосредственно через контактное сопротивление. Отношение тока, протекающего через контактное сопротивление, до и после шунтирования равно

$$\kappa_I = 1 + \frac{z_н(t)}{z_ш},$$

где $z_н(t) = z_к(t) + z_{эл}$.

Шунтированием достигается уменьшение напряжения на контактном стыке в κ_U раз

$$\kappa_U = \frac{z_н(t)\left[z_{эл} + z'_н(t)\right]}{z'_н(t)\left[z_{эл} + z_н(t)\right]},$$

где $z'_н(t) = \dfrac{z_н(t)\, z_ш}{z_ш + z_н(t)}$.

Таким образом, за счет перераспределения тока и напряжения в цепи с переменным контактным сопротивлением обеспечивается невыполнение одного или сразу обоих условий возникновения электрической дуги (2.11).

Экспериментально эффективность шунтирования $Э_ш$ может быть оценена как отношение эффективной полосы спектра электромагнитного поля вторичного излучения до и после шунтирования:

$$Э_ш = \frac{\Delta F}{\Delta F_ш}.$$

Измерения по методикам экспериментального моделирования контактных помех (глава 3) показали, что $Э_ш \geqslant 2$ около несущей частоты и $Э_ш \geqslant 5$ около частот гармоник облучающего электромагнитного поля передатчика. Уменьшение уровня контактных помех за счет шунтирования составляет 20—30 дБ.

В результате экспериментальных исследований выявилось, что особо тщательно необходимо шунтировать переменные контакты вблизи передатчиков и приемников.

Переменные контакты вблизи передающих антенн обычно работают в нелинейном режиме. На них наводится наибольшая ЭДС; кроме того, через них могут замыкаться токи смещения и токи утечки передающих антенн. Разность потенциалов между контактирующимися элементами достаточна для возникновения дуговых процессов или искрообразования. Необходимость тщательного шунтирования переменных контактов вблизи приемных антенн следует из малых затуханий контактных помех на пути их распространения к приемной антенне.

Шунтирующие перемычки изготавливаются из кабельных плетенок, гибких проводов. Основные требования, которые предъявляются к ним, сводятся к следующему:

— внутреннее сопротивление перемычек должно быть минимальным;

— параметры перемычек должны быть постоянными во времени и не должны изменяться при ударах, вибрациях, ускорениях, при изменении температуры и влажности;

— отсутствие процессов окисления и коррозии.

Известно, что сопротивление перемычек током высокой частоты носит индуктивный характер и находится в прямой пропорциональности от ее длины. Эксперимен-

тально установлено [2], что стальная перемычка длиной 300—350 мм на частоте 10 МГц имеет сопротивление 4—8 Ом, что является весьма большой величиной и в значительной степени снижает эффективность защиты.

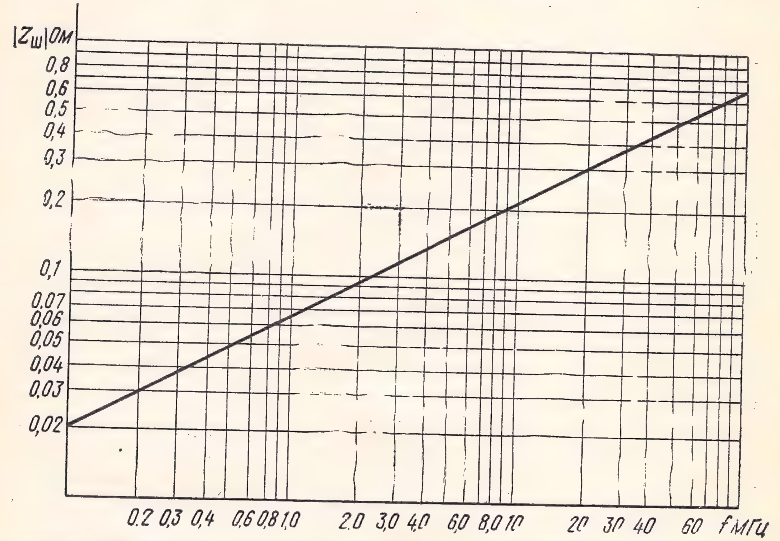


Рис. 5.2. Изменение модуля сопротивления шунта $|z_ш|$ на различных частотах

По результатам измерений авторов, активная составляющая медной посеребренной перемычки длиной 150 мм равна 0,02 Ом, индуктивность ее — 0,02 мкГ. На рис. 5.2 представлена зависимость модуля сопротивления такой перемычки от частоты. Из графика следует, что на частоте 20 МГц перемычка имеет сопротивление 0,4 Ом, т. е. в 20 раз больше сопротивления ее постоянному току.

Высокочастотное сопротивление перемычки может быть уменьшено последовательным соединением емкости. При этом образуется последовательный колебательный контур, имеющий резонанс на определенной частоте. Однако резонансная перемычка не будет пропускать постоянный ток.

В любом случае с точки зрения подавления контактных помех медные плетеные перемычки эффективнее стальных, у которых не только большее сопротивление,

но и неудовлетворительные контактные свойства между отдельными проволочками оплетки. На практике используют кабельные плетенки типа ПМЛ, провода марки ПАМГ, ПАБ, ПЩ.

В зависимости от условий эксплуатации, вида шунтируемого контактного промежутка перемычки могут быть приваренными или разъемными.

Если по условиям эксплуатации соприкасающиеся металлические детали имеют ограниченное взаимное перемещение и не требуют их снятия, то целесообразно использовать перемычки, приваренные с обеих сторон, чем обеспечивается постоянный контакт в местах их соединений. К таким деталям можно отнести обшивку фюзеляжа самолета, кузова вагона, автомашины, палубные соединения корабля, двери, различные люки и т. д.

В противном случае, когда величина взаимного перемещения деталей значительна, а по условиям эксплуатации и ремонта требуется разъединение этих деталей (например, рама вагона с тележкой, автосцепки и прочее), используются разъемные перемычки. При этом желательно один конец перемычки приварить, а на втором конце приварить или напаять наконечник, который должен быть соединен с другим контактирующимся элементом с помощью винтов, болтов. Для достижения малого сопротивления соединения целесообразно наконечник перемычки зажимать между двумя пластинами, одна из которых должна быть приварена к основанию. Наконечник и зажимные пластины желательно посеребрить.

Перемычки должны крепиться как можно ближе к шунтируемому контактному стыку и иметь минимально возможную длину, что необходимо не только для получения минимального шунтирующего сопротивления. В определенных условиях система «шунтирующая перемычка — контактирующие элементы» может упрощенно рассматриваться как «рамка», напряженность поля излучения которой прямо пропорциональна площади «рамки» и протекающему по ней току. Таким образом, на некоторых частотах шунтирующая перемычка не только не подавляет контактные помехи, а даже сможет способствовать увеличению их уровня. Замечено, что это происходит на частотах, при которых длина перемычки составляет приблизительно четверть длины волны.

Переменные контакты с трением качения и скольжения шунтируются графитовыми щетками, контактными пружинами.

Любой подвижный узел связи, так же как и стационарные, должен иметь устойчивое и малое сопротивление заземления. Если для стационарных объектов этот

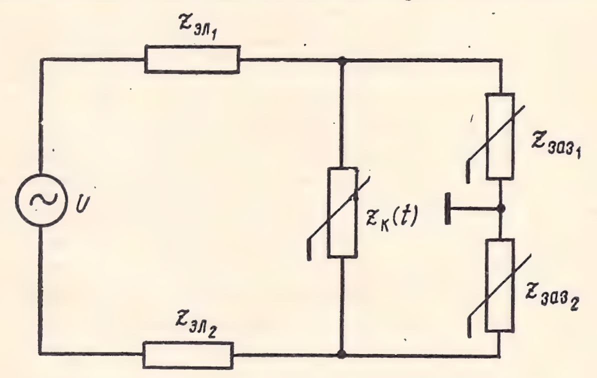


Рис. 5.3. Эквивалентная схема облучаемого переменного контакта с учетом сопротивления заземления

вопрос решается сравнительно просто, то для подвижных объектов связано с преодолением значительных трудностей. Величина сопротивления заземления в значительной мере определяет уровень высокочастотного потенциала, наводимого облучающим электромагнитным полем на металлическом кузове, корпусе подвижных объектов.

В отличие от эквивалентной схемы изолированного облучаемого переменного контакта, рассматриваемого в главах 2 и 3 книги, эквивалентная схема реального переменного контакта, образованного из частей конструкции подвижного объекта, включает сопротивления заземления элементов контактной пары (рис. 5.3).

Изменение тока в таком переменном контакте будет определяться величиной сопротивления нагрузки $z_н(t)$, вычисляемой по формуле

$$z_н(t) = \frac{z_к(t)\left[z_{заз_1}(t) + z_{заз_2}(t)\right]}{z_к(t) + z_{заз_1}(t) + z_{заз_2}(t)}, \qquad (5.1)$$

где $z_{заз_1}(t)$ и $z_{заз_2}(t)$ — сопротивления заземления элементов контактной пары.

Из формулы (5.1) следует, что при $z_{заз_1}(t) = z_{заз_2}(t) = 0$ ток в облучаемом переменном контакте не зависит от изменения контактного сопротивления и, следовательно, контактные помехи не возникают.

Для получения надежного соединения корпуса подвижного объекта с землей необходимо разработать систему их заземления. Для подвижных объектов типа автомашин, вагонов это сводится к проблеме обеспечения малого сопротивления между корпусом объекта и осями колес. В настоящее время промышленностью разработано специальное антипомеховое заземляющее устройство, которое обеспечивает надежное соединение корпуса вагонов с рельсами, устанавливаемое в буксах колес. Устройства с аналогичным принципом используются на судах для заземления грузовых электрокранов [2], на вертолетах — для шунтирования переменного контакта между осью и винтами. Как правило, все детали контактных устройств должны изготовляться из антикоррозионных материалов. Непосредственный контакт с вращающимися деталями происходит через графитовые, угольные щетки.

Если представляется техническая возможность для устранения контактных помех, используется метод экранирования. Суть его заключается в помещении источника контактных помех в металлический экран. Сам экран препятствует воздействию на переменные контакты электромагнитного поля радиопередатчика, тем самым устраняется прохождение тока через переменное контактное сопротивление.

В зависимости от конструкции и металла, из которого выполнен экран, он по-разному ослабляет магнитную и электрическую составляющие напряженности электромагнитного поля. Исходя из этого экраны разделяются на электростатические, магнитостатические и электромагнитные.

Экраны электростатического типа эффективно ослабляют электрическую составляющую поля путем замыкания силовых линий по поверхности металлического листа. Такие экраны эффективны на средних частотах, изготавливаются из меди в виде сплошных листов, сетки.

На низких частотах эффективны экраны магнитостатического типа, принцип которых основан на замыкании силовых линий магнитного поля в толще экрана.

На высоких частотах применяются экраны электромагнитного типа, обладающие одновременно свойствами предыдущих типов экранов. Для экранов электромагнитного типа используют стальные листы. Многослойные экраны этого типа состоят из слоев диамагнитных и ферромагнитных металлов.

Несмотря на простоту и эффективность, метод экранирования на подвижных объектах не всегда применим по конструктивным причинам. Поэтому на практике применяют перечисленные методы дифференцированно, исходя из конкретных условий.

Характерным для подвижных узлов связи является наличие большого количества всевозможных кабелей управления, связи, синхронизации, блокировки, коммутации и т. д. Некоторые из них располагаются около переменных контактов и тем самым становятся переносчиками контактных помех. Для уменьшения влияния контактных помех, распространяющихся по кабелям, последние необходимо экранировать и надежно заземлять на корпус подвижного объекта. Наибольшее подавление помех достигается при заземлении во многих точках.

Но применение экранирующей оплетки связано с повышением массы нагрузки подвижного объекта, его стоимости, поэтому альтернативным вариантом может стать установка фильтров. Особенно это относится к силовым кабелям, где тем самым одновременно подавляются распространяющиеся по ним индустриальные помехи.

В настоящее время отечественной промышленностью выпускаются различные помехоподавляющие фильтры, отличающиеся вносимыми затуханиями, током, проходящим через них, напряжением в цепи, габаритами и конструктивным исполнением. Основными типами фильтров являются фильтры ФПС, ФП, ФЕ, ФИС.

В процессе эксплуатации подвижных узлов связи необходим регулярный осмотр состояния средств помехоподавления: заменять окислившиеся и порванные перемычки, проверять жесткость их крепления к контактирующимся деталям, проверять величину сопротивления заземления.

В условиях подвижных узлов связи выбор того или иного способа устранения контактных помех определяется множеством конструктивных, технологических и

эксплуатационных факторов. Может случиться также, что необходимая степень подавления контактных помех от некоторых источников не может быть достигнута при раздельном использовании изложенных выше методов. В таких случаях рекомендуется комплексное применение методов шунтирования, заземления и экранирования.

5.2. ВЫБОР ТИПОВ И РАЗМЕЩЕНИЕ ПЕРЕДАЮЩИХ И ПРИЕМНЫХ АНТЕНН

Уменьшение влияния контактных помех на качество радиоприема в подвижных объектах может быть обеспечено выбором типов и правильным размещением приемных и передающих антенн.

В электромагнитном поле контактных помех преобладает электрическая составляющая. Очевидно, это происходит потому, что большинство переменных контактов, образующихся при движении подвижного объекта, может быть представлено в виде элементарного излучателя типа диполя или вибратора, нежели рамки.

Как элементарные электрические вибраторы можно рассматривать облучаемые верхнепалубные устройства судов, переменные контакты в межвагонных переходах, лопасти вертолетов и т. д. Любые облучаемые части конструкции подвижных объектов, образующие замкнутую петлю или виток, могут быть представлены в виде элементарных магнитных вибраторов.

Известно, что основное воздействие контактных помех на качество радиоприема происходит путем их проникновения на вход приемников через антенну. Поэтому приемные антенны магнитного типа будут менее чувствительны к контактным помехам, чем антенны электрического типа.

Магнитные антенны обладают еще одним достоинством — они более компактны, что позволяет размещать их в пределах ограниченного полезного объема подвижных объектов. Практика организации радиосвязи показала, что при близком размещении над «идеальной землей», какой является металлическая масса кузовов, корпусов подвижных объектов, магнитные антенны рамочного типа имеют более высокую эффективность, чем дипольные антенны электрического типа.

Экспериментальные исследования показали, что уровень контактных помех в приемных антеннах зависит

от размещения передающих и приемных антенн. Мерой влияния передатчиков подвижного объекта на приемные антенны может служить коэффициент развязки κ_p, равный отношению мощности контактных помех, измеренной на выходе приемной антенны в полосе частот около основного излучения передатчиков $P_{пр}$, к мощности излучения передатчика $P_{прд}$:

$$\kappa_p = \frac{P_{пр}}{P_{прд}}.$$

В подвижных объектах влияние передающих антенн на приемные может происходить не только через непосредственное облучение приемных антенн электромагнитным полем передатчиков, но и косвенным путем.

Контактные помехи, занимающие спектр частот около частоты основного излучения передатчика, достигают приемных антенн по многим помехонесущим элементам. Таким образом, влияние передающей антенны на приемные определяется целым комплексом взаимодействий, среди которых емкостные и индуктивные связи антенн с переносчиками контактных помех играют существенную роль.

Доказательством этого является то, что экспериментально установленное направление прихода контактных помех к приемной антенне не всегда совпадает с направлением на передающую антенну. Следовательно, как приемная, так и передающая антенны подвижного объекта должны быть расположены таким образом, чтобы их индуктивные и емкостные связи с переносчиком помех были минимальными. Обычно переносчиком помех служит кузов или корпус подвижного объекта. На железнодорожных объектах при их движении по электрифицированным участкам железной дороги образуется волноводный канал между контактным проводом и металлической крышей вагонов.

Таким образом, приемопередающие магнитные антенны, плоскости рамок которых ориентированы перпендикулярно к продольной оси автомашины, самолета, корабля, будут иметь меньшее взаимное влияние, чем при любой другой ориентации. На самолете, кроме того, передающие антенны целесообразно размещать сверху фюзеляжа, а приемные — под фюзеляжем.

Уровень контактных помех во многом определяется пространственным разносом передающих и приемных

антенн. Наибольшее воздействие на радиоприем оказывают контактные помехи от близко расположенных к приемной антенне переменных контактов. С удалением переменных контактов их электромагнитное поле вто-

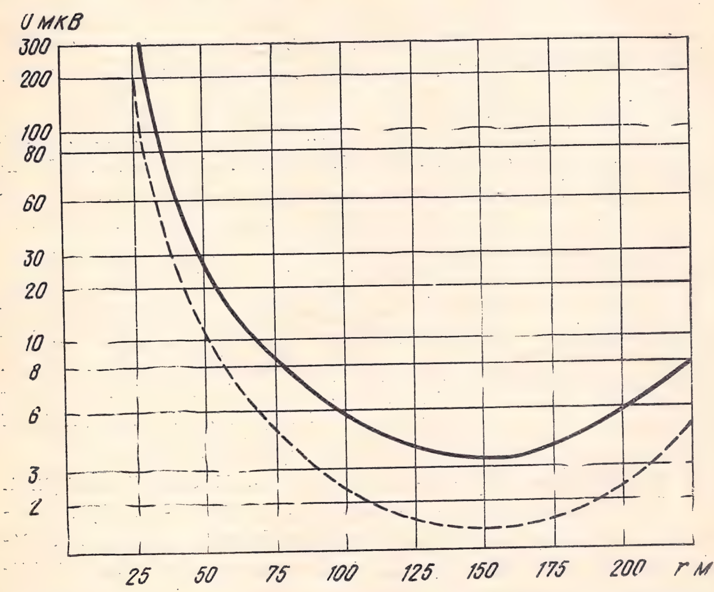


Рис. 5.4. Уровень высокочастотного потенциала, наводимого электромагнитным полем передатчика на вагонах железнодорожного состава в зависимости от расстояния

ричного излучения ослабевает по теории ближней зоны: сначала обратно пропорционально кубу, затем — квадрату расстояния. Следовательно, чем меньше величина облучающего переменный контакт электромагнитного поля, тем меньше суммарный уровень контактных помех. Эксперименты показали полную идентичность характера распределения уровня контактных помех по железнодорожному составу и распределения высокочастотного потенциала на вагонах состава (рис. 5.4).

Приемные антенны необходимо располагать подальше от интенсивных источников контактных помех. В условиях железнодорожных объектов желательнее размещать приемные антенны ближе к середине вагона, подальше от источников контактных помех в межвагон-

ных переходах, на самолетах и вертолетах — подальше от винта.

Особые требования с точки зрения борьбы с контактными помехами предъявляются к передающим антеннам подвижных узлов связи. Диаграмма направленности передающих антенн должна иметь минимум боковых лепестков, облучающих переменные контакты подвижного объекта.

Снижение уровня контактных помех достигается уменьшением плотности высокочастотного тока, вызываемого его утечкой через изоляторы передающей антенны. С этой целью необходимо содержать в чистоте поверхность изоляторов, проверять их диэлектрическую прочность. Металлизацией и заземлением площадок под передающими антеннами удается предотвратить широкое растекание высокочастотного тока, уменьшить вероятность возникновения дуговых процессов в облучаемых переменных контактах. Неизлучающие части передающих антенн целесообразно покрыть поглощающей краской.

В случае размещения на подвижном объекте двух и более передатчиков при наличии между ними функциональной или конструктивной связи возможно их взаимное воздействие, приводящее к появлению интермодуляционных излучений. В условиях подвижных объектов трудно разместить передающие антенны, чтобы между ними не было емкостной или индуктивной связи.

С точки зрения борьбы с контактными помехами наличие интермодуляции между передатчиками аналогично появлению в составе радиосредств подвижного узла связи дополнительных источников электромагнитных полей, облучающих переменные контакты объекта на интермодуляционных частотах. Поэтому при размещении передающих антенн необходимо стремиться к минимально возможному их взаимному влиянию. С этой целью не рекомендуется одновременная работа двух близко расположенных передающих антенн без достаточного частотного разноса. Эффективными средствами борьбы с интермодуляционными излучениями являются постановка специальных развязывающих фильтров в антенно-фидерные тракты передатчиков, работа передатчиков и приемников с настраиваемыми узкополосными антеннами.

5.3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Размещение на ограниченных площадях, определяемых размерами подвижных объектов, большого количества всевозможного радиоэлектронного оборудования порождает проблему обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) радиосредств подвижных узлов связи.

Понятие ЭМС достаточно емкое и включает широкий круг вопросов, поэтому определения ЭМС в различных работах неоднозначны.

В дальнейшем под электромагнитной совместимостью будем понимать такое состояние параметров и условий функционирования радиоэлектронных средств подвижного объекта, при котором обеспечивается возможность их одновременной работы в применяемом диапазоне частот без существенных взаимных помех и с необходимым качеством ведения связи.

Обеспечить ЭМС — это значит добиться нормальных условий функционирования для всех радиосредств объекта. Достигается это путем разработки и подбора радиоэлектронных средств с необходимыми параметрами, а также путем создания соответствующих условий для их работы.

Сложность решения проблемы ЭМС определяется необходимостью учета множества факторов.

Решение проблемы ЭМС начинается с этапа проектирования подвижного объекта при разработке или подборе соответствующих средств радиосвязи с необходимыми параметрами и продолжается в течение всех его жизненных циклов.

К числу параметров радиосредств, влияющих на ЭМС, относятся прежде всего характеристики передающих устройств по основному и неосновному излучению и чувствительность радиоприемных устройств по основному и неосновным каналам приема.

На ЭМС оказывают влияние мощности излучения передатчиков, диаграммы направленности антенн, вид излучения, длины волн и полосы частот, излучаемые передатчиками.

Основное излучение передатчиков предназначено для осуществления качественной передачи полезной инфор-

мации. Мощность основного излучения передатчика должна быть достаточной, чтобы обеспечить необходимое превышение уровня сигнала над помехой на входе приемника корреспондента по основному каналу приема и в то же время иметь минимально необходимую величину, чтобы оказать наименьшее мешающее воздействие на другие приемники подвижного объекта, для которых данное излучение является помехой.

С помощью диаграмм направленности антенн можно регулировать степень электромагнитной развязки передающих и приемных устройств, расположенных на объекте. При пространственном распространении радиоволн длина волны определяется протяженностью радиотрассы и условиями распространения, а необходимая излучаемая полоса частот — классом излучения. В идеальном случае передатчик должен излучать энергию только в ограниченной полосе около несущей частоты и передавать только заданную полезную информацию. Однако в реальных условиях передатчики всегда, кроме основного излучения, излучают некоторую долю энергии за пределами необходимой полосы излучения, которую без ущерба для скорости и качества передачи полезной информации можно снизить или исключить. Неосновные излучения передатчиков можно подразделить на побочные и внеполосные.

Побочное излучение передатчиков не связано с управлением полезными сигналами, а является результатом нелинейных процессов, происходящих в тракте передачи. В состав побочного излучения входят излучения на гармониках, субгармониках, комбинационных и интермодуляционных частотах.

Достаточно полная классификация и определение всех видов неосновного излучения радиоэлектронных средств приведены в работе [5].

Ниже рассматриваются только те из них, которые наиболее характерны для подвижных узлов связи и играют значительную роль в решении вопросов ЭМС в условиях наличия контактных помех.

Гармонические, субгармонические и комбинационные излучения радиопередатчиков в той или иной степени присущи всем современным передатчикам независимо от условий их эксплуатации. При этом необходимо иметь в виду, что на подвижных узлах связи около частот основного и побочных излучений передатчиков образуются

довольно широкие «полосы забития» контактными помехами, что резко усложняет на этих объектах помеховую обстановку и оказывает существенное влияние на назначение приемных рабочих частот.

Для подвижных объектов характерным является также наличие интермодуляционных побочных излучений. Эти излучения возникают на нелинейных элементах выходных каскадов передатчиков при взаимодействии нескольких близко расположенных передатчиков и их антенно-фидерных устройств.

Частота интермодуляционных излучений определяется по формуле

$$f_{им} = \pm \kappa_1 f_1 \pm \kappa_2 f_2 \pm \ldots, \pm \kappa_n f_n,$$

где f_1, f_2, ..., f_n — несущие частоты взаимодействующих передатчиков;

κ_1, κ_2, ..., κ_n — гармоники частот передатчиков.

Сумма $|\kappa_1| + |\kappa_2| + \ldots, + |\kappa_n|$ называется порядком интермодуляционной частоты.

Уровень интермодуляционного излучения тем выше, чем больше мощности передатчиков и сильнее связь между ними. С ростом порядка уровень интермодуляционного излучения падает.

Обеспечение ЭМС зависит также от параметров используемых на подвижных объектах радиоприемных устройств. В идеале желательно, чтобы радиоприемники имели высокую чувствительность основного канала и прямоугольные по форме амплитудно-частотные характеристики с достаточными полосами пропускания для качественного приема передаваемой информации, а также бесконечно большое затухание сигналов за пределами необходимой полосы пропускания.

Фактически реальные приемники имеют конечное, далеко не идеальное значение указанных параметров. Недостаточная избирательность приемников и нелинейность характеристик их усилительных и преобразовательных каскадов приводят к образованию неосновных каналов приема. При наличии взаимодействующих полезных и помеховых сигналов эти каналы приема необходимо иметь в виду для решения вопросов ЭМС.

Обычно основное усиление сигналов радиоприемниками осуществляется по промежуточной частоте. Это несомненное преимущество современных супергетеродинных приемников имеет свою и негативную сторону. Из-за не-

достаточной избирательности преселектора и тракта высокой частоты напряжения помехи могут проникнуть на входы смесительных каскадов. Если частота такой помехи или ее гармоники во взаимодействии с частотами гетеродинов и их гармониками образуют напряжение частоты, которая попадает в полосу пропускания тракта промежуточной частоты, то дальше такая помеха не может быть отфильтрована и попадает на выходные устройства радиоприемника. Канал, образованный таким образом, называется комбинационным побочным каналом приема, а частота — комбинационной частотой $f_к$.

Процесс образования комбинационного побочного канала приема и определения его частоты можно показать на следующих формулах.

При однократном преобразовании частоты

$$|n_1 f_к \pm m_1 f_г| = f_{п.\,ч_1} \pm \Delta f_{п.\,ч_1}; \qquad (5.2)$$

при двойном преобразовании частоты

$$|n_2 (n_1 f_к \pm m_1 f_{г_1}) \pm m_2 f_{г_2}| = f_{п.\,ч_2} \pm \Delta f_{п.\,ч_2}, \qquad (5.3)$$

где n_1, n_2, m_1, m_2 — целые числа, соответствующие номерам гармоник комбинационной частоты и частот гетеродинов;

$f_{п.\,ч_1}$, $f_{п.\,ч_2}$ — первая и вторая промежуточные частоты;

$f_{г_1}$, $f_{г_2}$ — частоты первого и второго гетеродинов;

$\Delta f_{п.\,ч_1}$, $\Delta f_{п.\,ч_2}$ — половина полосы пропускания трактов первой и второй промежуточных частот.

Суммы $n_1 + m_1$ или $n_2(n_1 + m_1) + m_2$ называются порядком частоты комбинационного канала.

Из формулы (6.2) можно определить частоту комбинационного побочного канала приема

$$f_к = \frac{\dfrac{(f_{п.\,ч_1} \pm f_{п.\,ч_2}) \pm m_2 f_{г_2}}{n_2} \pm m_1 f_{г_1}}{n_1}.$$

В полосу пропускания тракта промежуточной частоты может также попасть напряжение в результате взаимодействия нескольких мешающих сигналов и их

гармоник между собой или с частотой гетеродина и его гармониками:

$$\pm n_1 f_1 \pm n_2 f_2 \pm \ldots, \pm m f_г = f_{п.ч} \pm \Delta f_{п.ч},$$

где $n_1, n_2, \ldots, m$ — целые числа;
$f_1, f_2, \ldots, f_г$ — частоты мешающих сигналов;
$f_{п.ч}$ — промежуточная частота;
$\Delta f_{п.ч}$ — половина полосы пропускания тракта промежуточной частоты.

Это один из наиболее специфических каналов воздействия помех в подвижных узлах связи с наличием нескольких передающих и приемных радиоустройств.

На подвижных объектах может также наблюдаться явление блокирования входов радиоприемников. Заключается оно в уменьшении чувствительности и ухудшении селективных свойств приемника по отношению к полезному сигналу под воздействием высокого напряжения помехи с частотой вблизи основной полосы пропускания приемника. Мощное излучение близко расположенных передатчиков подвижного объекта перегружает каскады усиления и преобразования высокой частоты приемника; уровень принимаемого полезного сигнала подавляется до полного пропадания слышимости или в результате перекрестной модуляции происходит наложение на него сигнала от мешающего передатчика.

Таким образом, в условиях подвижных объектов основными частотными каналами воздействия радиопередатчиков на собственные радиоприемники являются:

— совпадение частот основного и побочных излучений с частотой основного канала приема;

— совпадение частот основного и побочных излучений с частотами побочных каналов приема.

При размещении на ограниченных площадях узлов связи подвижных объектов нескольких радиоприемных устройств приходится также иметь в виду и считаться с возможным наличием помех от излучения гетеродинов приемников, которое иногда может достигать значительных величин. Гетеродин излучает помехи через шасси и антенну приемника. Наибольший уровень этих помех (до 1000 мкВ и более) возникает при работе приемников на общие антенны и при их близком размещении. Для ослабления взаимного влияния приемников подвижного объекта их пространственное разнесение друг от друга должно быть более 1 м.

Некоторые параметры радиопередающих устройств по величине побочного излучения и радиоприемников по чувствительности и избирательности неосновных каналов приема стандартизированы (ГОСТ 12252—66, ГОСТ 13260—67, ГОСТ 13420—68 и др.). Однако разброс этих характеристик в процессе производства радиосредств получается довольно велик, что приходится учитывать при решении вопросов ЭМС.

Отсюда вытекает одно из требований по обеспечению ЭМС. Для оборудования подвижных объектов необходимо производить выбор и специальный отбор радиопередатчиков по минимуму фактического неосновного излучения, а радиоприемников — по максимуму затухания на побочных каналах приема.

Даже при наличии такого специального отбора передающих и приемных радиосредств для оборудования мобильных узлов связи в целях ослабления влияния неосновного излучения передатчиков и повышения затухания помех по побочным каналам приема радиоприемников на подвижных объектах необходимо устанавливать соответствующие высокочастотные фильтры нижних и верхних частот, а также перестраиваемые полосовые фильтры.

Взаимное влияние передающих и приемных радиосредств происходит не только через их антенно-фидерные устройства, но и через цепи питания и внутриобъектовые кабели связи, а также даже через корпуса аппаратуры. Мощные сигналы на частотах излучения собственных передатчиков могут проникать непосредственно на выходы смесителей и усилителей радиоприемных устройств подвижного объекта за счет паразитных емкостных связей с корпусом.

Для защиты от этого корпуса радиоприемников должны иметь надежное заземление, внутренний монтаж выполняется в экранированном блочном исполнении. Помещения радиоприемных центров подвижных объектов необходимо экранировать с эффективностью экранировки не менее 40—60 дБ.

Силовые и связные кабели внутри объекта должны прокладываться в металлических трубах, а связные линии — только экранированным кабелем. Входящие и исходящие цепи питания и линии связи помещения радиоприемного центра должны быть оборудованы соответ-

ствующими фильтрами с высокой степенью эффективности фильтрации.

В общем комплексе мероприятий по решению проблемы ЭМС важное место отводится организационно-техническим способам обеспечения совместной работы радиосредств подвижных объектов. С помощью только инженерно-технических мероприятий не всегда можно добиться требуемого уменьшения помех. К тому же проведение технических мероприятий связано со значительными экономическими затратами, особенно если используемые на подвижных объектах радиоэлектронные средства разрабатывались без учета требований ЭМС.

На подвижных объектах приемники расположены в ближней зоне излучения собственных передатчиков. В этих условиях важное значение имеет пространственное разнесение передающих и приемных устройств. Эффективность пространственного разноса на примере железнодорожного узла связи наглядно видна из рис. 4.7 и 5.4.

Однако на подвижных объектах ограничены возможности для достижения необходимого ослабления влияния передающих средств на приемники за счет только их взаимного удаления. Дополнительное ослабление уровня помех может быть достигнуто при использовании частотного разноса.

Частотный разнос — один из наиболее эффективных и оперативных способов обеспечения ЭМС. В основе способа лежит использование селективных свойств радиоприемных устройств. Отстройкой приемника всего на несколько кГц в коротковолновом и на несколько десятков кГц в ультракоротковолновом диапазоне волн от частоты мешающего излучения передатчика можно обеспечить их совместную работу в условиях стоянки.

При движении подвижных узлов связи частотный разнос между передающими и приемными устройствами определяется шириной полосы, пораженной контактными помехами. Частота приема должна отстоять от частот основного и побочных излучений передатчика больше чем половина ширины «полосы забития» около соответствующих мешающих излучений. Так, например, в ВЧ диапазоне рабочую частоту радиоприемника железнодорожного подвижного объекта нельзя назначать в интервале ±0,5 МГц около основного излучения радиопередатчиков, в интервалах 0,05—0,15 МГц около гармоник

до пятого номера, интермодуляционных излучений до третьего порядка включительно.

Учитывая, что соответствующие частотные отстройки должны быть соблюдены и для воздействия мешающих излучений по каналам побочного приема приемников, становится очевидным сложность назначения частот работы при установке на подвижном объекте большого числа передающих и приемных средств. При этом практически исключается свободный случайный выбор передающих и приемных частот.

Частотное регламентирование работы радиосредств подвижного объекта возможно лишь при учете закономерностей распределения контактных помех. В частности, использование неравномерности спектральной плотности контактных помех (группирование их только около частот основных и побочных — гармонических, интермодуляционных — излучений передатчиков) позволяет осуществлять правильное назначение частот радиосредств путем размещения приемных частот на участках с малой спектральной плотностью помех.

Выбор рабочих частот определяется не только помеховой обстановкой на подвижных объектах, но и условиями прохождения радиоволн при связи пространственной волной. Для решения задачи определения совместимых сочетаний рабочих частот радиосредств подвижных объектов можно использовать средства вычислительной техники, в частности ЭВМ. Алгоритм расчетов должен быть составлен с учетом частотного распределения контактных помех и обеспечения необходимой частотной отстройки по каждому из возможных каналов воздействия передатчиков на приемники.

Ширина «полосы забития» (а следовательно, и величина частотной отстройки) зависит от мощности излучения передатчиков, режима и скорости движения подвижного объекта. При эксплуатации подвижных объектов необходимо найти компромиссное решение между мощностью излучения передатчиков и уровнем возникающих контактных помех.

С точки зрения ЭМС увеличение энергетического потенциала радиолиний с подвижного объекта не всегда выгодно из-за проявления нелинейных свойств переменных контактов, которое приводит к появлению контактных помех и околокомбинационных частот. Экспериментально установлено, что увеличение мощности излуче-

ния передатчиков подвижного объекта выше 1 кВт нецелесообразно. Предпочтительнее увеличение мощности излучения передатчиков у корреспондентов, так как при этом появляется возможность работы приемных устройств подвижных объектов на частотах с большим уровнем контактных помех.

Практически для всех типов подвижных объектов существует оптимальная скорость движения, превышение которой нежелательно из-за резкого возрастания уровней контактных помех. Для автомашин, железнодорожного поезда эта скорость лежит в пределах 60—70 км/ч. Во избежание срыва радиосвязи из-за контактных помех при движении не рекомендуются резкие торможения и наборы скорости.

На узлах связи подвижных объектов должна быть организована частотно-диспетчерская служба, в функции которой вменяется постоянный контроль за помеховой обстановкой на основных и запасных частотах, выдача рекомендаций при смене рабочих частот. С этой целью подвижные объекты оснащаются соответствующей измерительной аппаратурой, позволяющей оперативно измерять уровни помех.

Лишь как крайнюю меру в случаях, когда невозможно обеспечить совместное функционирование радиосредств подвижных объектов, можно использовать временной разнос их работы.

В деле обеспечения ЭМС чрезвычайно важную роль играют выучка обслуживающего персонала, знание им характеристик и возможностей используемых радиосредств, наличие опыта работы в условиях сложной помеховой обстановки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обеспечение надежной радиосвязи с подвижных объектов неразрывно связано со знанием помеховой обстановки, характеризующейся многообразием видов помех и путей их воздействия на радиоприем. Тщательное изучение помеховой обстановки становится все более необходимым из-за возрастающей сложности обеспечения электромагнитной совместимости устанавливаемых радиосредств при наблюдающейся тенденции оснащения подвижных объектов большим числом разнообразного радиоэлектронного и электрического оборудования. Наряду с этим происходит увеличение мощностей излучения передатчиков, повышение чувствительности приемников, расширение частотного диапазона их работы.

Решение проблемы ЭМС в подвижных радиоэлектронных комплексах состоит в проведении в широком масштабе организационно-технических и инженерно-технических мероприятий, сочетающих как общественные, так и специфические способы подавления помех. Важное место при этом должно отводиться целенаправленным методам воздействия на помехи радиоприему от облучаемых переменных контактов подвижных объектов.

Как показано в книге, в условиях относительно близкого размещения передающих и приемных радиосредств и их антенн широкополосные контактные помехи существенно затрудняют выбор рабочих частот с требуемым превышением полезного сигнала над уровнем помех. Поиск доступных рабочих частот еще более усложняется из-за возникновения интермодуляционных излучений одновременно работающих радиопередатчиков, что с точки зрения борьбы с контактными помехами равносильно установке на подвижном объекте дополнительных источников облучающих электромагнитных полей.

Проблема борьбы с контактными помехами не имеет простого и универсального решения. Она включает целый комплекс мероприятий и должна решаться на всех этапах жизненного цикла подвижных узлов связи. Самого тщательного внимания заслуживает вопрос о введении в общесоюзном масштабе норм на уровень и частотное распределение контактных радиопомех, как это уже сделано в отношении индустриальных помех, характеристик передающих и приемных устройств, определяющих условия их совместного функционирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гоноровский В. А. Радиотехнические цепи и сигналы. М., «Сов. радио», 1974.

2. Григорьев А. Г., Матисен А. И., Патрин В. С. Защита радиоприема на судах от помех. Л., «Судостроение», 1973.

3. Заездный А. М. Теория нелинейных электрических цепей. М., «Связь», 1968.

4. Зернов Н. В., Карпов В. Г. Теория радиотехнических цепей. Л., «Энергия», 1972.

5. Князев А. Д., Пчелкин В. Ф. Проблемы обеспечения совместной работы радиоэлектронной аппаратуры. М., «Сов. радио», 1971.

6. Кравченко В. Устранение контактных помех. «Техника и вооружение», 1973, № 1.

7. Красюк Н. П., Дымович Н. Д. Электродинамика и распространение радиоволн. М., «Высшая школа», 1974.

8. Кремер И. Я. и др. Модулирующие помехи и прием радиосигналов. М., «Сов. радио», 1972.

9. Левин А. П. Контакты электрических соединителей радиоэлектронной аппаратуры. М., «Сов. радио», 1972.

10. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М., «Сов. радио», 1974.

11. Левин Б. Р., Виленчук А. С. Энергетические спектры случайных последовательностей радиоимпульсов. «Радиотехника», 1970, № 8.

12. Лютов С. А. Контактные помехи. «Техника и вооружение», 1969, № 5.

13. Реутт Е. К., Саксонов И. Н. Электрические контакты. М., Воениздат, 1971.

14. Роткевич В., Роткевич П. Техника измерений при радиоприеме. М., «Связь», 1969.

15. Смольянинов В. М., Филиппов Л. И. Синтез радиоприемников дискретных сигналов. М., «Высшая школа», 1969.

16. Федяев Н. С. Способ проверки эффективности действия заземляющих перемычек. Авторское свидетельство № 208031 от 21.2.1967, класс $21a^4$. Бюллетень изобретений № 3, 1968.

17. Финк Л. М. Теория передачи дискретных сообщений. М., «Сов. радио», 1970.

18. Хольм Р. Электрические контакты. М., ИИЛ, 1961.

19. IEEE International Convention Record. 20—23/III 1967.

ОГЛАВЛЕНИЕ

В ВОЕННОМ ИЗДАТЕЛЬСТВЕ ПО РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ ГОТОВЯТСЯ К ПЕЧАТИ СЛЕДУЮЩИЕ КНИГИ:

ВАСИЛЬЕВ С. К., ЗАХАРОВ В. Н., ПРОХОРОВ Ю. Ф. **КИБЕРНЕТИКА В СИСТЕМАХ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ**/ Под ред. В. Н. Захарова.— 15 л.— 90 к.

В книге, написанной по материалам зарубежной печати, излагаются современные методы анализа и синтеза линейных, дискретных и нелинейных автоматических систем военного назначения, рассмотрены вопросы создания и оценки оптимальных систем по различным критериям качества при учете случайных помех. Особый интерес представляют главы, посвященные вопросам исследования систем с помощью современных ЦВМ общего назначения. При этом приводятся комплексные программы и машинные алгоритмы на языках высокого уровня Алгол-60 и ПЛ/1, позволяющие непосредственно использовать их на практике и автоматизировать расчеты при анализе и синтезе сложных современных систем управления военного назначения. В книге приведено большое количество примеров кибернетических систем военного назначения. План 1979 г. № 78.

ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВООРУЖЕНИЯ/А. А. Червоный, В. А. Шварц, А. П. Козловцев, В. А. Чобанян; Под ред. проф. А. А. Червоного.— 5 л.— 25 к.

В настоящее время при эксплуатации и применении вооружения большое значение приобретает оценка его боевой эффективности. В данной работе, написанной по материалам открытой отечественной литературы, излагаются основные положения теории боевой эффективности вооружения применительно к стрельбе наземной артиллерии. Приводятся показатели эффективности стрельбы и даются приближенные методы их оценки для использования в войсках. Предназначена для офицеров и курсантов военных училищ, изучающих вопросы боевого применения вооружения. План 1979 г. № 79.

ГОРБУНОВ В. А. **ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОБНАРУЖЕНИЯ ЦЕЛЕЙ.**— 10 л.— 65 к.

В книге дана классификация систем наблюдения по различным признакам, рассматриваются методы оценки эффективности радиотехнических средств наблюдения как источников информации для

современных автоматизированных систем управления. Приведен анализ движения и взаимного положения цели и наблюдателя в различных ситуациях поиска и обнаружения, рассмотрены принципы рационального размещения средств поиска и обнаружения. Описание иллюстрировано примерами по оценке эффективности обнаружения целей. Книга написана по материалам зарубежной печати. Она рассчитана на военных специалистов, эксплуатирующих средства наблюдения, и на широкий круг читателей, интересующихся проблемами поиска и обнаружения целей. План 1979 г. № 80.

КРАТКИЙ СЛОВАРЬ ПО РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ/А. П. Верҗиковский, Н. В. Габис, Н. М. Китаев, И. И. Тынянкин.— 2-е изд., перераб. и доп.— 40 л.— 2 р. 90 к.

Словарь содержит около 4000 терминов и толкований к ним по радиолокации, радиосвязи, радионавигации, телевидению, телеуправлению, радиометеорологии, гидроакустике, инфракрасной технике, электронной, вычислительной и радиоизмерительной технике, а также по отдельным элементам, блокам и узлам радиоэлектронной аппаратуры; рассчитан на широкий круг читателей, занимающихся вопросами радиоэлектроники. План 1979 г. № 81.

ЛУКИН А. И. **СИСТЕМЫ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ** (Анализ систем массового обслуживания с отказами в военной практике).— 10 л.— 65 к.

Проблемы военного дела относятся к числу наиболее сложных вопросов, исследование которых требует всесторонней оценки как качественных, так и количественных процессов, характеризующих задачи организации, ведения и обеспечения боевых действий. В книге на основе методов теории массового обслуживания и математического программирования с применением ЭВМ даны практические рекомендации для обоснования принимаемых решений. Книга написана по материалам открытой зарубежной печати. Она рассчитана на лиц, занимающихся вопросами исследования операций, организации и обеспечения боя. План 1979 г. № 82.

Книги Военного издательства можно приобрести в магазинах и киосках «Военная книга», а также по почте наложенным платежом в домашний адрес, направив заказ ближайшему отделу «Военная книга — почтой» по одному из перечисленных адресов:

480091, Алма-Ата, ул. Кирова, 124.
690000, Владивосток, ул. Ленинская, 18.
252133, Киев, 133, бульвар Леси Украинки, 22.
443099, Куйбышев, ул. Куйбышевская, 91.
191186, Ленинград, Д-186, Невский проспект, 20.
290007, Львов, проспект Ленина, 35.
220029, Минск, ул. Куйбышева, 16.
113114, Москва, М-114, Даниловская набережная, 4/а.
630076, Новосибирск, Красный проспект, 59.

270009, Одесса, ул. Перекопской дивизии, 16/6.

226047, Рига, ул. Большая Смилшу, 16.

344018, Ростов-на-Дону, Буденновский проспект, 76.

620062, Свердловск, ул. Ленина, 101.

380007, Тбилиси, пл. Ленина, 4.

680038, Хабаровск, ул. Серышева, 42.

672000, Чита, ул. Ленина, 111/а.

700077, Ташкент, 77, Луначарское шоссе, 61.

720001, Фрунзе, 1, ул. Киевская, 114.

Книги Военного издательства можно заказать предварительно, до выхода их из печати, в местном магазине «Военная книга» и по почте.

Андрей Яковлевич Клементенко,
Борис Алексеевич Панов,
Валериан Филиппович Свешников

КОНТАКТНЫЕ ПОМЕХИ РАДИОПРИЕМУ

Редактор *П. И. Никонов*
Обложка художника *Б. С. Иванова*
Художественный редактор *Н. Б. Попова*
Технический редактор *Г. В. Дьякова*
Корректор *Л. М. Хмельнова*

ИБ № 401

Сдано в набор 17.10.77. Подписано в печать 14.09.79. Г-22621.
Формат 84×108/32. Бумага № 2. Литер. гарн.
Высокая печать. Печ. л. 3 3/4. Усл. печ. л. 6,30. Уч.-изд. л. 5,670
Тираж 22 000 экз. Изд. № 6/2365. Зак. 9-350. Цена 30 коп.

Воениздат
103160, Москва, К-160
Набрано во 2-й типографии
191065, Ленинград, Д-65, Дворцовая пл., 10
Отпечатано на книжной фабрике «Коммунист» РПО «Полиграфкнига» Госкомиздата УССР, 310012, Харьков-12 ,Энгельса, 11.

30 к.

В И